

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI MALZEMELERDEN YAPILMIŞ TÜPLERİN STATİK VE DİNAMİK
YÜKLER ALTINDA ENERJİ SÖNÜMLEME KARAKTERİSTİKLERİNİN
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Dursun MERİÇ

**MAYIS 2014
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FARKLI MALZEMELERDEN YAPILMIŞ TÜPLERİN STATİK VE DİNAMİK
YÜKLER ALTINDA ENERJİ SÖNÜMLEME KARAKTERİSTİKLERİNİN
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK BELİRLENMESİ

Makina Müh. Dursun MERİÇ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09/04/2014
Tezin Savunma Tarihi : 02/05/2014

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ

Trabzon 2014

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Dursun MERİÇ tarafından hazırlanan

FARKLI MALZEMELERDEN YAPILMIŞ TÜPLERİN STATİK VE DİNAMİK
YÜKLER ALTINDA ENERJİ SÖNÜMLEME KARAKTERİSTİKLERİNİN
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK BELİRLENMESİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 15 / 04 / 2014 gün ve 1549 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda

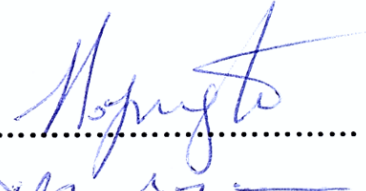
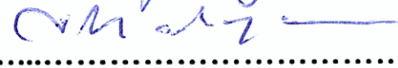
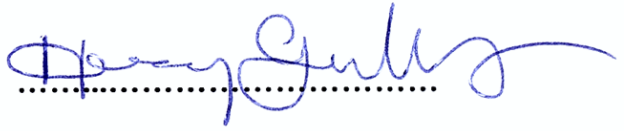
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU

Üye : Doç. Dr. Volkan KAHYA

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ


.....

.....

.....

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışmada artan motorlu araç sayısı ile otomotiv endüstrisinin önemli sorunlarından biri haline gelen çarpışma davranışının iyileştirilmesi konusunda araştırmalar yapılmıştır. Çarpışma anında ortaya çıkan enerjinin sönmelenmesi için kullanılan ince cidarlı tüplerin enerji sönmleme davranışı üzerine deneyler ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve rehberliğini her zaman yanımda hissettiğim danışmanım Yrd. Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ'ye teşekkür etmeyi görev addediyorum. Deneylerin yapılmasında bana yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Hüseyin İPEK ve Arş. Gör. Durukan Burak DİLEK'e teşekkür ediyorum.

Ayrıca bugüne gelmemde emeği olan adını zikredemeyeceğim herkese ve her zaman yanımda olup beni destekleyen aileme teşekkür ediyorum.

Bu çalışma 2008.112.003.8 kod numaralı proje ile K.T.Ü. Araştırma Fonu tarafından desteklenmiştir. Bu nedenle fon yöneticilerine de teşekkürlerimi sunarım.

Dursun MERİÇ

Trabzon 2014

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum "Kompozit Malzemelerin Değişken Hızlardaki Kırılma Davranışının Deneysel Ve Sayısal İncelenmesi" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç Dr. Hasan GEDİKLİ'nin sorumluluğunda tamamladığımı verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma süresinde bilimsel araştırma ve etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması sonucunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 05/02/2014

Dursun MERİÇ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No.
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Enerji Sönümleyici Sistemler	3
1.2.1. Enerji Sönümleyici Sistemlerin Karakteristiği	4
1.2.2. Enerji Sönümleyici Sistemlerin Tasarım Prensipleri	7
1.3. İnce Duvarlı Tüplerin Enerji Sönümleme Özellikleri	8
1.4. Köpük Dolgulu Tüplerin Enerji Sönümleme Özellikleri	10
1.5. Kaynak Dikişli Tüplerin Enerji Sönümleme Özellikleri	13
1.6. Yarıлма ile Enerji Sönümleme	14
1.7. Optimizasyon Yönteminin Enerji Sönümlemeye Uygulanması.....	15
1.8. Tezin Konusu ve Amacı	18
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	19
2.1. Deneysel Çalışmalar	19
2.1.1. Düz Tüp, Alt Kalıp Geometrileri ve Malzeme Özellikleri.....	19
2.1.2. Statik Deneyler	21
2.1.3. Dinamik Deneyler	22
2.2. Sayısal Çalışmalar	24

2.2.1. Düz Tüplerin Statik Analizi.....	24
2.2.2. Düz Tüplerin Dinamik Analizi	26
2.2.3. Konik Boş ve Konik Dolgulu Tüplerin Dinamik Analizi	26
2.2.4. Konik Boş ve Dolgulu Tüplerin Optimizasyonu	29
3. BULGULAR VE İRDELEME.....	34
3.1. Düz Tüplerin Statik Kuvvet Zaman Grafikleri.....	34
3.2. Düz Tüplerin Dinamik Kuvvet Zaman Grafikleri	46
3.3. Düz Tüplerde Alt Kalıp Açısının Pik Kuvvete ve Ortalama Kuvvete Etkisi	58
3.4. Konik Boş ve Dolgulu Tüplerin Dinamik Analizi	61
3.4.1. Sonlu Elemanlar Yönteminde Modelin Doğruluğu.....	61
3.4.2. İleri Beslemeli Sinir Ağlar Modelinin Doğruluğu.....	62
3.4.3. Optimum Sonuçlar.....	75
4. SONUÇLAR.....	76
5. ÖNERİLER	77
6. KAYNAKLAR.....	78
7. EKLER.....	83

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

FARKLI MALZEMELERDEN YAPILMIŞ TÜPLERİN STATİK VE DİNAMİK YÜKLER
ALTINDA ENERJİ SÖNÜMLEME KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL VE
SAYISAL OLARAK BELİRLENMESİ

Dursun MERİÇ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ
2014, 82 Sayfa, 1Ek Sayfa

Bu çalışmada enerji sönmleme sistemlerinden olan ince cidarlı tüplerin enerji sönmleme kabiliyeti deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Çalışmadaki numuneler; Al6063, St52 ve Al6063&St52 malzemelerinden ve alt uç kısmına çentik açılmış ince cidarlı dairesel kesitli tüplerden hazırlanmıştır. Bunun yanında farklı koniklik açlarına (0°, 15°, 30° ve 45°) sahip alt kalıplar tüplerin yırtılmasını kolaylaştırmak için kullanılmıştır. Deneyler, tüplerin enerji sönmleme özelliklerini belirlemek için statik ve dinamik yükleme şartları altında yapılmıştır. Ayrıca sayısal analizler Ls-Dyna paket programı kullanılarak aynı deney şartları için gerçekleştirilmiştir. İlave yapılan sayısal çalışmalarda ise kaynak dikişli olarak Al6061 alüminyum ve AISI1018 çeliğinden üretilen farklı konikliklere (0°, 5°, 10° ve 15°) sahip içi boş ve köpük dolgulu tüplerin analizleri yapılmıştır. Bu analizde köpük malzemesi için ağdan bağımsız düzgün parçacık hidrodinamiği yöntem kullanıldı. Alt kalıplı deneysel ve sayısal sonuçlardan artan alt kalıp açısı ile pik kuvvetin düştüğü, sönmlenen enerji miktarı ve çarpma kuvvetinin azaldığı görülmüştür. Bununla beraber enerji sönmleme kabiliyetinin köpük dolgulu tüplerde boş tüplere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaynak Dikişli Tüpler, Optimizasyon, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Düzgün Parçacık Hidrodinamiği, Yırtılma, Enerji Sönmleme

Master Thesis

SUMMARY

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL DETERMINATION OF ENERGY ABSORBING
CHARACTERISTICS OF TUBES MADE OF DIFFERENT MATERIALS UNDER
STATIC AND DYNAMICS LOADINGS

Dursun MERİÇ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor Assist. Prof. Hasan GEDIKLI
2014, 82 Pages, 1 Pages Appendix

In this study, the capability of thin-walled tubes as an energy absorber is numerically and experimentally investigated. The specimens used in this study are prepared from the notched tubes with circular cross section, and is made of Al6063, St52 and Al6063&St52. However, the lower dies having various conical angles (0° , 15° , 30° and 45°) are used to be easily tear of the tubes. Experiments were performed under static and dynamic loading conditions to determine the energy absorption capabilities of the tubes. Also, the numerical analyses are pursued for the same experimental conditions using Ls-Dyna software. Moreover additional numerical, analyses of the empty and foam filled tubes, which join different materials of Al6061 aluminum and AISI 1080 steel using the tailor welded technique, are performed for the different conical angles (0° , 5° , 10° and 15°). Meshless smooth particular hydrodynamics method is used for foam material in this analyses, It was obtained that, the peak forces, absorbed energies and crushing forces decrease with increasing conical angle of the lower die. Also, the energy absorption capability of foam filled tubes are determined to be higher than empty tubes.

Key words: Tailor-Welded Tubes, Optimization, Finite Element Method, Smooth Particle Hydrodynamics, Tearing, Energy Absorption

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No.
Şekil 1.1. Araç gövdesinde kullanılan ince cidarlı yapılar [6].....	2
Şekil 1.2. Tüpler için tipik bir çarpma kuvveti-yer değiştirme grafiği	6
Şekil 1.3. Açık (a) ve kapalı (b) hücreli metal köpük [33]	11
Şekil 1.4. Köpük malzemeler için tipik gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	12
Şekil 1.5. Araçta kullanılan kaynak dikişli yapılar [47]	14
Şekil 1.6. Yarıлма ile enerji sönümlenmenin şematik görünümü	15
Şekil 1.7. Genetik algoritma için akış diyagramı [55].....	17
Şekil 2.1. Deney numunelerinin geometrik (a) özellikleri ve (b) görünümü.....	20
Şekil 2.2. Ara aparat (a) ölçüsü ve (b) görünümü.....	20
Şekil 2.3. Alt kalıplar;(a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45°	21
Şekil 2.4. MTS Criterion 45 serisi üniversal test sistemi	22
Şekil 2.5. Serbest düşme test sistemi	23
Şekil 2.6. Düz tüplerin solu elemanlar modeli.....	24
Şekil 2.7. Konik tüplerin geometrik görünümü	26
Şekil 2.8. Boş (a) ve köpük dolgulu (b) tüp için sonlu elemanlar- SPH modeli	29
Şekil 2.9. Boş ve köpük dolgulu tüpler için optimizasyon akış şeması.....	31
Şekil 2.10. İki girişli yapay sinir ağı.....	32
Şekil 3.1. Alt kalıp açısı 0° olan Al6063 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği	34
Şekil 3.2. Alt kalıp açısı 15° olan Al6063 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği	35
Şekil 3.3. Alt kalıp açısı 30° olan Al6063 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği.....	36
Şekil 3.4. Alt kalıp açısı 45° olan Al6063 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği.....	36
Şekil 3.5. Statik durumda Al6063 tüplerin $\lambda=0^{\circ}$, $\lambda=15^{\circ}$, $\lambda=30^{\circ}$ ve $\lambda=45^{\circ}$ alt kalıp açıları için deneysel (a) ve sayısal (b) deformasyon şekilleri.....	37
Şekil 3.6. Statik yükleme için Al6063 tüplerin farklı alt kalıp açılarına göre sönümlenen enerji-yer değiştirme grafikleri.....	37
Şekil 3.7. Alt kalıp açısı 0° olan St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği.....	38

Şekil 3.8. Alt kalıp açısı 15° olan St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği.....	39
Şekil 3.9. Alt kalıp açısı 30° olan St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği.....	39
Şekil 3.10. Alt kalıp açısı 45° olan St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği.....	40
Şekil 3.11. Statik durumda St52 tüplerin $\lambda=0^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$ ve $\lambda=45^\circ$ kalıp açıları için deneysel (a) ve sayısal (b) deformasyon şekilleri.....	41
Şekil 3.12. Statik şartlar altında St52 tüplerin farklı alt kalıp açılarına göre sönmölenen enerji yer değiştirme grafikleri.....	41
Şekil 3.13. Alt kalıp açısı 0° olan Al6063&St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği	42
Şekil 3.14. Alt kalıp açısı 15° olan Al6063&St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği	43
Şekil 3.15. Alt kalıp açısı 30° olan Al6063&St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği	43
Şekil 3.16. Alt kalıp açısı 45° olan Al6063&St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği	44
Şekil 3.17. Statik durumda Al6063&St52 tüplerin $\lambda=0^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$ ve $\lambda=45^\circ$ kalıp açıları için deneysel (a) ve sayısal (b) deformasyon şekilleri.....	45
Şekil 3.18. Statik şartlar altında Al6063&St52 tüplerin farklı alt kalıp açılarına göre sönmölenen enerji-yer değiştirme grafikleri	45
Şekil 3.19. Alt kalıp açısı 0° olan Al6063 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği.....	46
Şekil 3.20. Alt kalıp açısı 15° olan Al6063 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği.....	47
Şekil 3.21. Alt kalıp açısı 30° olan Al6063 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği.....	47
Şekil 3.22. Alt kalıp açısı 45° olan Al6063 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği.....	48
Şekil 3.23. Dinamik durumda Al6063 tüplerin $\lambda=0^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$ ve $\lambda=45^\circ$ kalıp açıları için deneysel (a) ve sayısal (b) deformasyon şekilleri.....	49
Şekil 3.24. Dinamik şartlar altında Al6063 tüplerin farklı alt kalıp açılarına göre sönmölenen enerji-yer değiştirme grafikleri.....	49
Şekil 3.25. Alt kalıp açısı 0° olan St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği.....	50
Şekil 3.26. Alt kalıp açısı 15° olan St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği.....	51
Şekil 3.27. Alt kalıp açısı 30° olan St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği.....	51
Şekil 3.28. Alt kalıp açısı 45° olan St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği.....	52
Şekil 3.29. Dinamik durumda St52 tüplerin $\lambda=0^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$ ve $\lambda=45^\circ$ kalıp açıları için deneysel (a) ve sayısal (b) deformasyon şekilleri.....	53

Şekil 3.30. Dinamik şartlar altında St52 tüplerin farklı alt kalıp açılarına göre sönmölenen enerji-yer değiştirme grafikleri.....	53
Şekil 3.31. Alt kalıp açısı 0° olan Al6063&St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği	54
Şekil 3.32. Alt kalıp açısı 15° olan Al6063&St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği	55
Şekil 3.33. Alt kalıp açısı 30° olan Al6063&St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği	55
Şekil 3.34. Alt kalıp açısı 45° olan Al6063&St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği	56
Şekil 3.35. Dinamik durumda Al6063&St52 tüplerin $\lambda=0^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$ ve $\lambda=45^\circ$ kalıp açıları için deneysel (a) ve sayısal (b) deformasyon şekilleri.....	57
Şekil 3.36. Dinamik şartlar altında Al6063&St52 tüplerin farklı alt kalıp açılarına göre sönmölenen enerji-yer değiştirme grafikleri	57
Şekil 3.37. Al6063 tüplerin artan kalıp açılarına göre pik kuvvet değişimi	59
Şekil 3.38. St52 tüplerin artan kalıp açılarına göre pik kuvvet değişimleri.....	59
Şekil 3.39. Al6063&St52 tüplerin artan kalıp açılarına göre ilk pik kuvvet değişimleri	60
Şekil 3.40. Köpük dolgulu tüpler zamana bağlı enerji değişim eğrileri	62
Şekil 3.41. Boş tüplerde farklı koniklik açıları için ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) özgül enerji sönmöleme (SEA) miktarının tüpün üst parça kalınlığına (t_1) göre değişimi	64
Şekil 3.42. Boş tüplerde farklı koniklik açıları için ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) pik kuvvet değerlerinin tüpün üst parça kalınlığına (t_1) göre değişimi	64
Şekil 3.43. Boş tüplerde farklı koniklik açıları için ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) çarpışma kuvveti veriminin (CFE) tüpün üst parça kalınlığına (t_1) göre değişimi	65
Şekil 3.44. Köpük dolgulu tüplerde farklı koniklik açıları ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) özgül enerji sönmöleme (SEA) miktarının tüpün üst parça kalınlığı (t_1) ve köpük yoğunluğuna ($\rho_{\text{KÖPÜK}}$) bağlı değişimi	65
Şekil 3.45. Köpük dolgulu tüplerde farklı koniklik açıları için ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) pik kuvvet değerlerinin tüpün üst parça kalınlığı (t_1) ve köpük yoğunluğuna ($\rho_{\text{KÖPÜK}}$) bağlı değişimi.....	67
Şekil 3.46. Köpük dolgulu tüplerde farklı koniklik açıları ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) çarpışma kuvveti verimi (CFE) değerinin tüpün üst parça kalınlığı (t_1) ve köpük yoğunluğuna ($\rho_{\text{KÖPÜK}}$) bağlı değişimi	68

Şekil 3.47. $t_1=0.5$ mm, köpük dolgulu ve farklı koniklik ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) açılara sahip Al6061&AISI1018 tüplerin çarpma kuvveti zaman grafikleri.....	69
Şekil 3.48. $t_1=0.5$ mm, köpük dolgulu ve farklı koniklik ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) açılara sahip Al6061&AISI1018 tüplerin zaman-sönümlenen enerji grafikleri	70
Şekil 3.49. $t_1=0.5$ mm, boş ve farklı koniklik ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) açılara sahip Al6061&AISI1018 tüplerin çarpma kuvveti zaman grafikleri	70
Şekil 3.50. $t_1=0.5$ mm boş ve farklı koniklik ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) açılara sahip Al6061&AISI1018 tüplerin zaman-sönümlenen enerji grafikleri	71
Şekil 3.51. $t_1=0.5$ mm, köpük dolgulu (a) ve boş (b) tüplerin farklı koniklik açıları için deformasyon durumları.....	71
Şekil 3.52. $t_1=1.9$ mm, köpük dolgulu ve farklı koniklik ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) açılara sahip Al6061&AISI1018 tüplerin çarpma kuvveti zaman grafikleri.....	72
Şekil 3.53. $t_1=1.9$ mm, köpük dolgulu ve farklı koniklik ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) açılara sahip Al6061&AISI1018 tüplerin zaman-sönümlenen enerji grafikleri	73
Şekil 3.54. $t_1=1.9$ mm ve boş, farklı koniklik ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) açılara sahip Al6061&AISI1018 tüplerin çarpma kuvveti zaman grafikleri	73
Şekil 3.55. $t_1=1.9$ mm ve boş, farklı koniklik ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) açılara sahip Al6061&AISI1018 tüplerin zaman-sönümlenen enerji grafikleri	74
Şekil 3.56. $t_1=1.9$ mm, köpük dolgulu (a) ve boş (b) tüplerin farklı koniklik açıları için deformasyon durumları.....	74

TABLolar DİZİNİ

	Sayfa No.
Tablo 1.1. Türkiye'nin kaza istatistikleri	1
Tablo 2.1. Tüpler için yapılan statik deney özellikleri	21
Tablo 2.2 Tüpler için yapılan dinamik deney özellikleri	23
Tablo 2.3. Al6063 ve St52 malzemelerinin lineer elastik özellikleri ve Johnson-Cook malzeme sabitleri	25
Tablo 2.4. Al6061, AISI1018 ve Al6061&AISI1018 malzemelerinin lineer elastik özellikleri ve Johnson-Cook malzeme sabitleri.....	27
Tablo 2.5. Alüminyum köpüğe ait şekil değiştirme-gerilme değerleri.....	28
Tablo 2.6. Boş ve dolu tüplerde optimizasyon işleminde kullanılan örnekler ve malzeme özellikleri.....	32
Tablo 3.1. Kalıp açısına göre ortalama kuvvet değerleri (kN)	61
Tablo 3.2. Optimizasyon analizi sonucunda elde edilen R2 değerleri.....	63
Tablo 3.3. Boş ve köpük dolgulu tüplerin farklı koniklik açılarına bağlı olarak optimum köpük yoğunluğu ve üst parça kalınlığı değerleri	75

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Otomobil, taşıma ve nakliyecilik sektöründeki gelişmelerden dolayı yollardaki araç sayısı her geçen gün artmaktadır. Yollardaki araç sayısının artması ile bu araçların sebep olduğu kazalar sonucunda maddi hasarlar, yaralanmalar ve ölümlerde artışlar meydana gelmektedir. Türkiye’de, 1990 ile 2012 yılları arasında meydana gelen kazalar ve bu kazalar sonucu ölü ve yaralı sayısı Tablo 1’de verilmiştir [1]. Tablo 1’ den görülebileceği gibi özellikle yolcu taşıma güvenliği önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Bundan dolayı araştırmacılar, insan güvenliğini sağlamak ve araçları daha güvenli hale getirmek için birçok çalışma yapılmaktadır.

Tablo 1.1. Türkiye'nin kaza istatistikleri

Yıl	Toplam Taşıt	Nüfus(Bin)	Kaza Sayısı	Kaza Oranı	Ölü Sayısı	Yaralı Sayısı
1990	3 750 678	56 154	115 295	30,7	6 317	87 668
1991	4 101 975	57 272	142 145	34,7	6 231	90 520
1992	4 584 717	58 392	171 741	37,5	6 214	94 820
1993	5 250 622	59 513	208 823	39,8	6 457	104 330
1994	5 606 712	60 637	233 803	41,7	5 942	104 717
1995	5 922 859	61 763	279 663	47,2	6 004	114 319
1996	6 305 707	62 909	344 643	54,7	5 428	104 599
1997	6 863 462	64 064	387 533	56,5	5 125	106 246
1998	7 371 541	65 215	458 661	62,2	6 083	125 793
1999	7 758 511	66 350	465 915	60,1	5 713	125 158
2000	8 320 449	67 420	500 664	60,2	5 510	136 751
2001	8 521 956	68 365	442 960	52,0	4 386	116 203
2002	8 655 170	69 302	439 777	50,8	4 093	116 412
2003	8 903 843	70 231	455 637	51,2	3 946	118 214
2004	10 236 357	71 152	537 352	52,5	4 427	136 437
2005	11 145 826	72 065	620 789	55,7	4 505	154 086
2006	12 227 393	72 974	728 755	59,6	4 633	169 080
2007	13 022 945	70 586	825 561	63,4	5 007	189 057
2008	13 765 395	71 517	950 120	69,0	4 236	184 468
2009	14 316 700	72 561	1 053 346	74,0	4 324	201 380
2010	15 095 603	73 723	1 106 201	73,0	4 045	211 496
2011	16 089 528	74 724	1 228 928	76,4	3 835	238 074
2012	17 033 413	75 627	1 296 634	76,0	3 750	268 079

Meydana gelecek kazaları önlemek için aktif ve pasif olmak üzere iki çeşit güvenlik önlemi geliştirilmiştir. Aktif güvenlik önlemleri kazanın meydana gelmesini önlemek için taşıtın frenleme ve kontrol sistemlerini güçlendirmek, kaza ihtimalini sezip otomatik olarak devreye giren araç sistemlerinden oluşur. Pasif güvenlik önlemleri ise bir kaza ile karşılaşılması durumunda araç, kargo ya da yolcuların kazadan en az şekilde hasar görmesini sağlayacak tasarımların ve malzemelerin kullanılmasını kapsar [2].

Aktif güvenlik önlemleri kazaların oluşumunu tamamen önleyememektedir. Bundan dolayı meydana gelen kazaların etkilerini azaltmak için pasif güvenlik sistemleri önem kazanmaktadır. Pasif güvenlik tedbirleri çarpma boyunca oluşan enerjinin sönmülmesi temeline dayanmaktadır. Pasif güvenlik önlemlerinin en önemli uygulaması ince cidarlı yapılardır. İnce cidarlı yapılar, bir boyutu (kalınlık) diğer iki boyut yanında küçük olan üç boyutlu yapılardır [3]. Otomobil, uçak ve gemilerdeki parçaların çoğu ince cidarlı yapılardan oluşmaktadır. Kalınlıklarına göre yük taşıma kapasitesinin yüksek olması nedeniyle ince cidarlı yapılar, enerji sönmüleyici elemanlar olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [4].

İnce cidarlı yapıların en yaygın tipleri ince cidarlı tüplerdir. İnce cidarlı tüpler enerji sönmüleyici olarak Şekil 1.1'de görüldüğü gibi araçlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [5]. Bu tüplerin kalıcı plastik deformasyona uğramaları çarpışma enerjisini sönmülemelerine, dolayısıyla araca ve araç içindeki yolculara iletilen kuvvetin azalmasına sebep olur.



Şekil 1.1. Araç gövdesinde kullanılan ince cidarlı yapılar [6]

İnce cidarlı tüpler; dairesel, kare ve çokgen gibi farklı kesit özelliklerine sahip olabilirler. Bunlar içerisinde yaygın kullanılanlarının başında dairesel ve kare kesitli düz

tüpler gelmektedir. Bu tüpler geniş uygulama alanlarına sahip olup düşük maliyetli ve kolay üretilebilmektedirler. Ayrıca konik tüpler, S şeklindeki tüpler, petek yapılar, kompozit tüpler, köpük veya kum dolgulu tüpler enerji sönümleyici olarak kullanılan diğer ince cidarlı tüp yapılarıdır. Silindirik ve kare tüpler aksel çarpışma, aksel altüst (ters) olma, aksel yarıma, yanal bükülme, yanal basma, yanal düzleşme gibi çeşitli kullanım şekillerinde enerji sönümlemeye sahiptirler. Bunlar arasında metalik silindirik tüpler düşük ağırlıklı yüksek dayanım ve sertlik, düşük maliyet ve kolay üretim gibi avantajlarından dolayı tercih edilmektedir [7].

Kullanım alanları çok olduğundan enerji sönümleyiciler ile alakalı çalışmalar silindirik ve kare tüpler üzerine yoğunlaşmıştır. Aksel çarpışma işlemleri yanal çarpışmalara göre daha büyük enerji sönümlerken, aksel çarpışmada pik kuvvetin büyüklüğü bir dezavantajdır. Pik kuvvetin büyüklüğü, ilk çarpışma anında araca ve içindekilere yüksek kuvvetler etki edeceğinden ciddi yaralanmalara (iç kanamalara) meydana getirebilmektedir. Araştırmacılar pik kuvvetin düşürülmesi için çeşitli ince cidarlı tüp yapılar geliştirmişlerdir. Kaynak dikişli tüpler, konik tüpler, farklı kalınlıklara sahip tüpler bunlardan bazılarıdır. Ayrıca pik kuvvetin düşürülmesi amacıyla farklı açılara sahip alt kalıplar, uçlarına çentik açılmış tüpler, bunların dışında çok köşeli tüpler W-kirişler uçaklarda ve otoyol kenarlarında yaygın olarak kullanılan ince cidarlı yapılarıdır.

Son yıllarda tüplerin enerji sönümleme kapasitelerini geliştirmek için köpük, metalik köpükler, petek yapılar ve elyaf takviyeli tüpler kullanılmaktadır. Aksel çarpışmada koni biçimindeki tüplerin düz tüplere göre daha kararlı olduğu ve pik kuvveti düşürmesine karşın daha az enerji sönümleme kabiliyetine sahiptirler.

1.2. Enerji Sönümleyici Sistemler

Hızlı gelişen sanayiye bağlı olarak 1960'lı yıllardan günümüze kadar çok çeşitli enerji sönümleyici sistemler çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları arasında otoyol kenarlarındaki çarpışma bariyerleri, nükleer reaktörlerin korunması, deniz yapıları, endüstriyel uygulamalar, motosiklet kaskları sayılabilir. Ayrıca enerji sönümleyici sistemler; otomobil, havacılık, denizcilik ve lokomotif endüstrisi gibi birçok endüstri alanında önemli rol oynamaktadır. Enerji sönümleyici sistemlerin tasarımındaki amaç, çarpışma anında enerjiyi

kontrollü olarak sönümleyerek yolcunun güvenliğini sağlamak ve olası yaralanmalarını en aza indirmektir [5-8].

Enerji sönümleyici sistemler kinetik enerjiyi tamamen ya da kısmen başka bir tür enerjiye dönüştüren sistemlerdir. Enerji dönüşümü sıkıştırılabilir akışkanlarda basınca, katılarda ise elastik ve plastik şekil değiştirmeye dönüşür [9]. Elastik şekil değiştirme enerjisi tekrar geri kazanılırken plastik şekil değiştirmede enerji geri kazanılmaz ve kalıcı plastik deformasyon oluşur. Metalik sistemlerde yüksek enerjiyi sönümleyebilmek için kaliteli bir enerji sönümleyici, kinetik enerjiyi geri kazanımsız olarak plastik deformasyon enerjisine dönüştürecek şekilde tasarlanmalıdır. Geri kazanımsız enerji; plastik deformasyona, sürtünme enerjisine ya da kırılma enerjisine dönüşebilir [10].

Enerji sönümleyici sistemler temel olarak beş kategoriye ayrılabilir:

- 1- İnce cidarlı yapılar
- 2- Konik tüpler
- 3- Balküpü yapılar
- 4- Köpükler
- 5- İzolatörler

1.2.1.Enerji Sönümleyici Sistemlerin Karakteristiği

Çarpışma sırasında sönümlenen enerji miktarının belirlenmesi yolcu güvenliği için önemlidir. Sönümlenen enerji miktarı kuvvet-zaman grafiğinden veya kuvvet-yer değiştirme grafiğinden Denklem 1.1 kullanılarak hesaplanır.

$$E_t = \int_0^{u_{\max}} F(u) du \quad (1.1)$$

burada F çarpışma kuvveti, u ve u_{\max} sırasıyla yer değiştirme ve maksimum yer değiştirmedir.

Birim Kütle Başına Sönümlenen Enerji

Birim kütle başına sönümlenen enerji miktarı enerji sönümleyici sistemlerin en önemli karakteristiklerindedir. Toplam sönümlenen enerjinin sistemin (çarpışmadan önce) kütlelerine oranı olarak tanımlanır.

$$E_m = \frac{E_t}{m} \quad (1.2)$$

Burada E_m birim kütle başına yutulan enerji, E_t sistem tarafından sönümlenen toplam enerji ve m enerji sönümleyicinin deformasyona uğramamış kütleleridir. Özellikle ağırlığın önemli olduğu sistemlerde birim kütle başına sönümlenen enerji çok önemli bir tasarım kriteridir ancak tek kriter değildir. Birim kütle başına sönümlenen enerji, enerji sisteminin veriminin bir göstergesidir. Köpük dolgulu tüplerin ağırlıkları köpüğün ağırlığından dolayı boş tüplerden daha fazladır fakat köpük dolgulu tüpler daha iyi birim kütle başına enerji sönümleme kabiliyetine sahiptirler [11]. Birim kütle başına yutulan enerjinin yükseltilmesi isteniyorsa kütlelerine göre dayanımı yüksek malzemeler kullanılmalıdır.

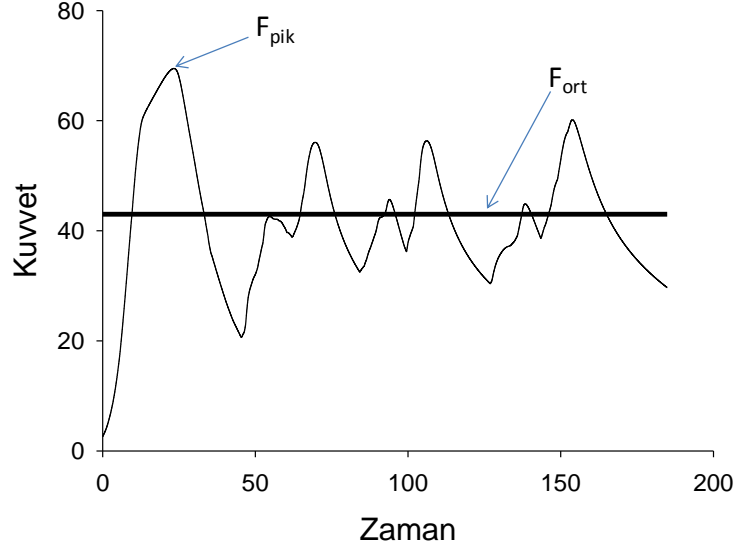
Ortalama Çarpma Kuvveti

Ortalama çarpma kuvveti, toplam sönümlenen enerji miktarının toplam deformasyon miktarına oranıdır.

$$F_{ort} = \frac{1}{u} \int_0^u F(u) du \quad (1.3)$$

İnce cidarlı bir tüpün tipik bir çarpışma davranışı Şekil 1.2’de verildiği gibidir. Grafikten de görüldüğü gibi çarpma kuvveti yer değiştirmeye göre dalgalı bir davranış sergilemektedir. Başlangıçtaki en yüksek kuvvet değerine pik kuvvet adı verilmektedir. F_{pik} , çökme için başlangıç kuvvetini gösterir ve bu noktadan sonra enerji sönümleme işlemi başlar. İlk katlanma (bulking) başlayana kadar kuvvet artar, maksimum değerine ulaştıktan sonra (F_{pik}) ikinci katlanma oluşumuna kadar azalır. İkinci katlanma oluşum başlangıcı ile kuvvet tekrar artar ve katlanma sayısı kadar bu süreç devam eder. Ancak ideal enerji sönümleyici sistemlerde çarpmanın başladığı andan maksimum yer değiştirmeye kadar çarpma kuvvetinin sabit kalması istenir. Bu durumda kuvvet-yer değiştirme grafiği dikdörtgensel (sabit çarpma kuvveti) bir şekil alır. Çarpışma mekaniğinde en önemli sorunlardan biri ilk çarpışma anında

oluşan büyük pik kuvvetini azaltmak ve tüm çarpışma boyunca kuvveti olabildiğince yatay konumda tutmaktır. Bunun nedeni ise ilk çarpışma kuvvetinin yüksek olduğu durumlarda araç içindeki insanlara iletilecek yüksek kuvvetin ciddi sağlık sorunlarına, kargolara iletilecek kuvvetin ise büyük maddi hasarlara yol açabilmesidir.



Şekil 1.2. Tüpler için tipik bir çarpma kuvveti-yer değiştirme grafiği

Çarpma Kuvveti Verimi

Çarpma kuvveti verimi, ortalama kuvvetin maksimum kuvvete oranıdır. İdeal enerji sönümleyiciler için çarpma kuvveti verimi % 100 olmalıdır. Genel olarak enerji sönümleyici sistemler ortalama kuvvet ile enerji sönümleme karakteristiklerini gösterirler ancak çarpma anında enerji sönümlemenin yani plastik deformasyonun başlaması için ilk pik kuvvet çok yüksektir. Böyle durumlarda plastik deformasyonu başlatmak, ilk pik kuvveti azaltmak ve çarpışma kuvveti verimini arttırmak için çeşitli mekanizmalar kullanılabilir.

$$\eta = \frac{F_0}{F_{pik}} \quad (1.4)$$

1.2.2. Enerji Sönümleyici Sistemlerin Tasarım Prensipleri

Enerji sönümleyici sistemlerin tasarımı ve seçilmesi sistemin çalışma amacı ve çalışma koşullarına göre değişiklik göstermektedir. Enerji sönümleyici sistemlerin tasarımı ve seçimi kullanıldıkları yere ve çalışma amaçlarına göre değişmekle birlikte her durumda enerji sönümleyici sistemler kinetik enerjiyi kontrollü ya da belirlenmiş bir oranda sönümlemeyi amaçlamaktadır. Yine de enerji sönümleyici sistemlerin tasarımı ve seçimi için aşağıda verilen temel prensipler göz önünde bulundurulmalıdır.

Enerjinin tek yönlülüğü

Yapıların ve malzemelerin enerji dönüşümü tek yönlü olmalıdır. Yani yapılar ve malzemeler başlangıçtaki kinetik enerjinin büyük bir kısmını plastik deformasyon ile elastik olmayan enerjiye (kırılma, sürtünme) dönüştürürler.

Sınırlı sabit tepki kuvveti

Enerji sönümleyici tasarımında ve analizinde üzerinde durulan temel konulardan biri de pik kuvvetin güvenli bir değerin altında tutulmasıdır. Büyük deformasyon sürecinde yeterli enerji sönümleme kapasitesi sunarken çarpma tesiri altındaki enerji sönümleyicilerin oluşturduğu reaksiyon kuvvetini belli bir sınır değerin altında tutmak gerekir. Bu sınır değerler üzerinde meydana gelen hasarlarda daha önce de ifade edildiği gibi insanlar üzerinde ciddi yaralanmalara sebep olabilmektedir.

Uzun strok (yer değiştirme)

Bir enerji sönümleyici yapı için yukarıda belirtildiği gibi tepki kuvveti sınırlıdır. Ancak kuvvet tarafından yapılan iş, kuvvetin büyüklüğü ile kuvvetin etki doğrultusunda aldığı yol kadardır. Dolayısıyla yapı büyük miktarlarda enerji sönümlese buna bağlı olarak yer değiştirme de büyük olur. Bu da kabin güvenliği için daima bir tehdit oluşturur.

Kararlı ve tekrarlanabilir deformasyon şekli

Çok belirsiz çalışma yükleriyle başa çıkmak için tasarlanan yapının deformasyon şekli ve enerji sönümleyebilme kapasitesi kararlı ve tekrarlanabilir olmalıdır. Enerji sönümleyici yapılara uygulanan dış dinamik yüklerin ritmi, şekli, büyüklüğü ve dağılımı gibi belirsizlikler tahmin edilmelidir.

Hafiflik ve yüksek enerji yutabilme kapasitesi

Enerji sönümleyici sistemlerin hafif olması özgül enerji sönümleme kapasitesinin (birim kütle başına sönümlenen enerji) de yüksek olmasını sağlar. Bu kriterler özellikle araçlardaki enerji sönümleyicileri ile kişisel güvenlik sistemleri için hayati öneme sahiptir. Otomobil üreticileri araçların çarpma performansını iyileştirmek için düzeltmeler yaptıklarında olası ağırlık artışlarını da dikkate almak zorundadırlar. Ayrıca ağırlıktaki ufak bir artış da daha fazla yakıt tüketimi ve çevre kirliliği anlamına gelir.

Düşük maliyet ve kolay kurulum

Enerji sönümleyicilerin imalatı düşük maliyetli, bakım ve montajı ise kolay olmalıdır. Günümüzün rekabetçi dünyasında bütün sönümleyiciler sınırlı bütçeyle imal edilmektedir. Sonuç olarak bütün ekonomik yapıların üretimi bu ekonomik sınırlar içinde tutulmaktadır [12].

1.3. İnce Duvarlı Tüplerin Enerji Sönümleme Özellikleri

Silindirik tüpler aksel olarak darbeye maruz kaldıklarında çap kalınlık (D/t) ve boy çap (L/D) oranına göre yüzük modu (aksel simetrik), elmas modu ve karışık mod (aksel simetrik olmayan) olmak üzere üç şekilde deforme olurlar. Belirli L/D ve D/t değerleri için deformasyon yüzük modunda başlayıp elmas moda geçmesi ile karışık mod ortaya çıkar.

Çarpışma sonucu oluşan ortalama kuvvet için Alexander [13] ilk olarak Denklem 1.6'da verilen eşitliği geliştirmiştir.

$$F_{ort} = 6\sigma_{ak} \sqrt{Dt^3} \quad (1.5)$$

Burada σ_{ak} akma gerilmesi, D çap, t cidar kalınlığıdır. Alexander tarafından geliştirilen bu model basit olmakla birlikte her durum için doğru sonuç vermemektedir. Johnson [14] silindirik tüpler için ortalama kuvvet denklemini aşağıdaki gibi geliştirmiştir.

$$F_{ort} = 8.91\sigma_{ak} \sqrt{Dt^3} \left(1 - 0.61\sqrt{\frac{t}{D}} \right) \quad (1.6)$$

Andrews ve arkadaşları ince cidarlı yapılarda D/t oranının 75'den büyük olduğu durumlar için deformasyon şeklinin elmas modda gerçekleştiğini ve katlanma sayısının D/t oranının yükselmesi ile arttığını göstermiştir. Abramowicz [15] ve Jones [16] 1984 ve 1986 yıllarında Alexander'ın ortalama kuvvet için verdiği eşitlik ilk olarak

$$F_{ort} \cong \sigma_{ak} t (6\sqrt{Dt} + 3.44t) \quad (1.7)$$

ve sonrasında

$$F_{ort} \cong \sigma_{ak} t \frac{6\sqrt{Dt} + 3.44t}{0.86 - 0.57\sqrt{\frac{t}{D}}} \quad (1.8)$$

şeklinde geliştirilmiştir. Wierzbicki ve arkadaşları [17] ortalama kuvvet için Denklem 1.9'u önermişlerdir.

$$F_{ort} = 7.933\sigma_{ak} t^2 \sqrt{\frac{D}{t}} \quad (1.9)$$

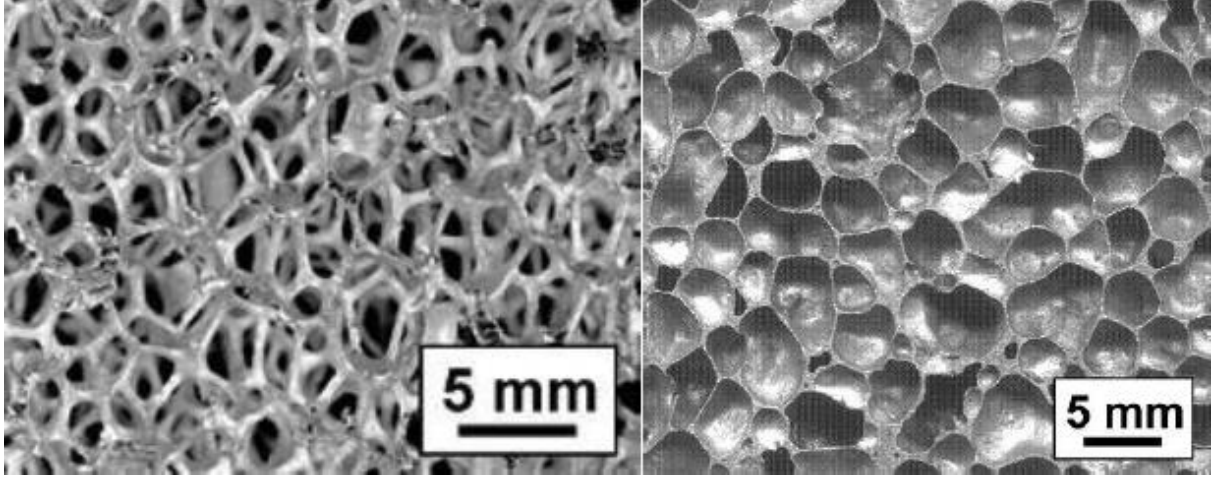
Guillow ve diğerleri [18] aksenal ve statik yükleme altındaki ince cidarlı alüminyum tüplerin çarpışma davranışını araştırmıştır, D/t oranının yükselmesi ile maksimum kuvvetin ortalama kuvvete oranının da yükseldiğini göstermiştir. Daneshi ve arkadaşları [19] üzerine yiv açılmış tüplerin aksenal yükleme altındaki pik kuvvetini araştırmıştır. Bu çalışmada üzerine farklı miktarda yiv açılarak tüplerin enerji sönümlene kabiliyetinin ve oluşacak pik kuvvetin stabilize edilebileceği görülmüştür. Mamalis ve arkadaşları [20] LS-DYNA ile aksenal yüklemeye maruz kalan sekizgen kesitli çelik ince cidarlı tüplerin enerji sönümlene kabiliyetini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Pedro ve arkadaşları [21] kalıp kullanarak silindirik ince cidarlı yapıların dışa geri çevirme sonucunda oluşan deformasyon ve enerji sönümlene kabiliyetlerini deneysel ve sayısal olarak araştırdılar. Nagel ve Thambiratnam [22], aksenal ve statik yükleme altındaki kare kesitli düz ve konik ince cidarlı yapıların farkı et kalınlıkları, farklı koniklik açılara ve konik kenar sayısına göre enerji sönümlene kabiliyetlerini araştırmışlardır. Pik kuvvetin koniklik ile arttığını yaptıkları sayısal çalışmalarda göstermişlerdir. Tarigopula [23], yüksek dayanımlı çeliklerin aksenal yükleme

altında statik ve dinamik çarpışma davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Zhang ve arkadaşları [24] eksenel çarpışma altında önceden iç basınç ile basınçlandırılmış ince cidarlı tüplerin enerji sönümlene kabiliyetlerini araştırmıştır. Ali Alavi Nia ve arkadaşları [25] farklı geometrik kesitli ince cidarlı tüplerin eksenel yükleme altında statik olarak enerji sönümlene kabiliyetlerini araştırmış, dairesel kesitli tüplerin en iyi enerji sönümlene kabiliyetine ve pik kuvvete sahip olduklarını göstermiştir. Bambach [26], karbon takviyeli alüminyum ve çelik polimer malzeme ile kaplanmış kare kesitli içi boş ince cidarlı yapıların çarpışma davranışını araştırmış ve ince cidarlı yapıların polimer malzeme ile sarılması sonucunda enerji sönümlene kabiliyetlerinin geliştiğini göstermiştir. Salehghaffari ve arkadaşları [27] eksenel yüklemeye maruz kalmış ince cidarlı dairesel kesitli tüplerin enerji sönümlene kabiliyetini geliştirmek için çalışmışlardır. Bu çalışmalarda üzerine yiv açılmış tüpler ile yiv açılmamış tüpleri deneysel olarak incelemiş ve tüplerin üzerine yiv açılarak enerji sönümlene kabiliyetlerinin geliştirebileceğini belirlemişlerdir. Ghamarian ve diğerleri [28] eksenel yükleme altında ince cidarlı ve bir tarafı kapatılmış alüminyum tüplerin çökme mekanizmasını ve enerji sönümlene kabiliyetini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Bir ucu kapatılmış ve kapatılmamış tüp karşılaştırıldığında kapatılmış tüplerin maksimum pik kuvvetlerinin çarpışma davranışında istenildiği gibi düşük ve kontrollü olduğunu göstermiştir. JieSong ve diğerleri [29] çarpışma sırasında oluşan büyük pik kuvvetleri daha uygun seviyelere getirmek için origami desenli ince cidarlı yapıların enerji sönümlene kabiliyetlerini deneysel ve sayısal olarak incelemiş ve origami desenli tüplerin daha kararlı bir çarpışma dayanımı sergilediğini belirlemişlerdir. Fan [30] 6, 8, 12 ve 16 köşeli ince cidarlı yapıların enerji sönümlene kabiliyeti üzerine sayısal ve deneysel inceleme yapmış ve on 12 ince cidarlı yapının en iyi enerji sönümlene kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Ali Alavi Nia [31], tek ve çok hücreli kare kesitli ince cidarlı tüplerin enerji sönümlene üzerine çalışmalar yapmıştır ve çok hücreli ince cidarlı yapıların tek hücrelilere göre çok daha verimli olduğunu göstermiştir.

1.4. Köpük Dolgulu Tüplerin Enerji Sönümlene Özellikleri

Bir taşıtın maliyeti ve buna bağlı olarak güvenlik sınırları kullanılan malzemenin kalitesine göre değişmektedir. Bu nedenle, son yıllardaki alüminyum ve alaşımlarının kullanımı hızla artmaktadır. Bununla beraber günümüzde hafif sayılan (düşük yoğunluklu) metal alaşımlarının endüstride en çok aranan ve üzerine yatırım yapılan bir araştırma dalı

haline gelmesi köpük metallerin kullanım alanlarını artırmaktadır. Özellikle yeni üretim tekniklerinin geliştirilmesi ve kabul edilebilir üretim maliyetlerine ulaşılması, otomotiv sektöründe köpük metallerin potansiyel kullanım sahalarını genişletmiştir. Üstün darbe sönümlenme özellikleri ve hafiflikleri göz önünde bulundurulduğunda metalik köpükler önemli avantajlar sağlamaktadır [32].



(a)

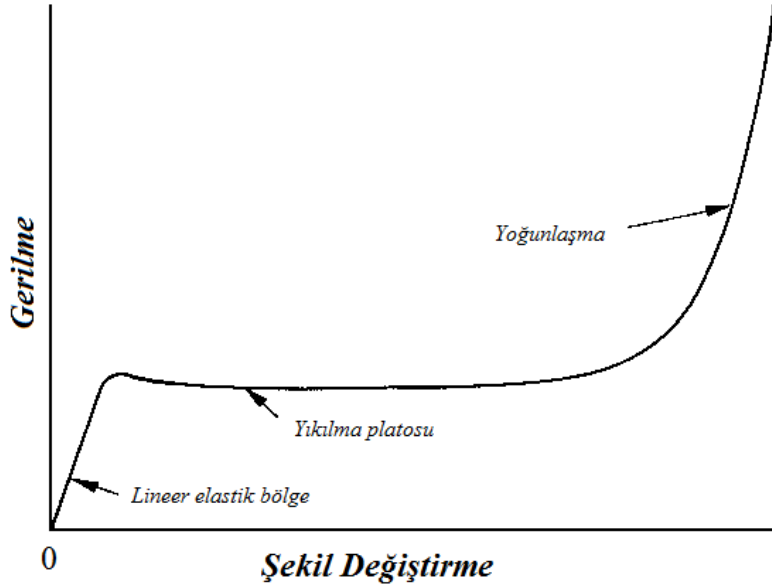
(b)

Şekil 1.3. Açık (a) ve kapalı (b) hücreli metal köpük [33]

Şekil 1.3'te görüldüğü gibi metalik köpüklerin “açık hücreli” ve “kapalı hücreli” olmak üzere iki çeşidi bulunmaktadır. Metalik köpüklerin %80-90'ı gözeneklerden oluşmaktadır. Eğer gözenekler birbiriyle bağıntılı bir halde bulunuyorsa bu yapıya “açık hücreli köpük metal” adı verilmektedir. “Kapalı hücreli köpük metalleri” de ise hücrelerin her birinin içerisinde gaz hapsedilmiştir ve birbirinden yalıtılmış bir halde bulunmaktadır [34].

Şekil 1.4'te metalik köpüklerin tipik deformasyon grafiği gösterilmektedir. Metalik köpükler düşük şekil değiştirme değerlerinde doğrusal elastik davranış gösterirler. Artan şekil değiştirme ile gerilme-şekil değiştirme grafiğinde uzun bir “yıkılma platosu” gözlenir ve bu bölgeyi sabit şekil değiştirmede gerilmenin oldukça dik şekilde arttığı “yoğunlaşma” bölgesi izler. Basma kuvvetine maruz kalan köpüğün plato bölgesi gözeneklerin yıkılması ile ilişkilidir. Gözenek kapanması, elastik-plastik köpüklerde (metal vs.) gözenek duvarlarının birbirine çarparak dağılması ile meydana gelir. Gözenekler neredeyse tamamen kapandığında gözenek duvarları birbirine değeri ve uygulanan kuvvet katı malzemenin kendisini

sıkıştırmaya başlar. Bu durum gerilme-şekil değiştirme grafiğinin son bölgesinde gerilmenin hızla artmasını sağlar [35].



Şekil 1.4. Köpük malzemeler için tipik gerilme-şekil değiştirme grafiği

Metalik köpük malzemeler, hafiflikleri ve aksenal yük altında etkili enerji sönümlene kabiliyetlerinden dolayı ince cidarlı tüplerde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Özellikle yıkılma plato bölgesindeki uzun strok ve sabit yük altında enerji sönümlene kabiliyetleri çok iyidir. Köpük dolgulu tüplerin enerji sönümlene kabiliyetleri sadece köpük ve sadece tüpün enerji sönümlene kabiliyetinin toplamından daha iyi olmaktadır [36]. Köpüğün yoğunluğu enerji sönümlene kabiliyetine etki eden en önemli unsurlardandır. Kare ve dairesel kesitli konik köpük dolgulu tüplerin enerji sönümlene kabiliyetleri ile alakalı literatürde birçok çalışma yapılmıştır.

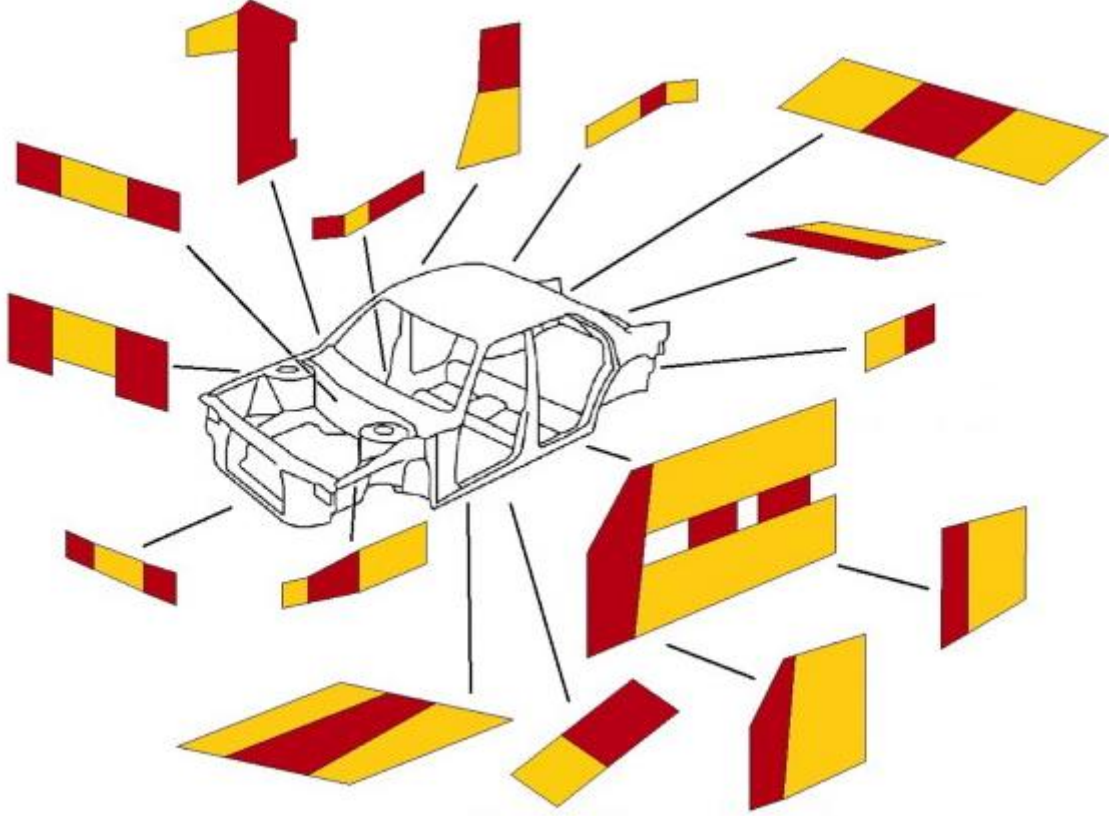
Seitzberger ve diğerleri [37] köpük dolgulu kare, beşgen ve altıgen kesitli ince cidarlı yapıların enerji sönümlene kabiliyetini aksenal yükleme altında deneysel olarak incelemiştir ve alüminyum köpük dolgusunun tüplerin enerji sönümlene kabiliyetlerinin arttırdığını göstermiştir. Chen ve Wierzbicki [38] aksenal yükleme altındaki ince cidarlı çok hücreli ve köpük dolgulu yapılar üzerinde çalışmış, çok hücreli yapıların ve köpük dolgusunun çarpışma dayanımını arttırdığını göstermiştir. Toksoy ve Güden [39] ince cidarlı yapıları köpükle doldurmanın etkisi üzerine yaptıkları çalışmada köpük malzemelerin tüplerin enerji sönümlene kabiliyetlerine olumlu katkı yaptıklarını belirlemişlerdir. Zhang ve Gengdong [40] köpük dolgulu tek ve çok hücreli yapıların enerji sönümlene kabiliyetlerini araştırmak için sayısal çalışmalar yaptılar ve çok hücreli köpük dolgulu yapıların enerji sönümlene

kabiliyetlerinin tek hücreli yapılara göre daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Ahmad ve Thambiratnam [41-42] köpük dolgulu konik ince cidarlı tüplerin aksenel yükleme altındaki çarpışma davranışlarını inceledikleri çalışmalarında, konik tüpün enerji sönümlene kabiliyetinin köpük dolgusu ile iyileştiğini tespit etmişlerdir. Rajendan ve diğerleri [43] çelik malzeme içerisine sabitlenmiş alüminyum köpüğün çarpışma davranışını serbest düşme test cihazında incelediler. Alavi Nia ve diğerleri [44] balküpü yapıların içini köpük doldurmanın aksenel ve statik yükleme durumunda çarpışma davranışı üzerine etkilerini deneysel olarak araştırmışlar ve balküpü yapılarda köpük dolgu kullanmanın enerji sönümlene kabiliyetini üç kata kadar arttırdığını göstermişlerdir. Ghamarian ve diğerleri [45] bir ucu kapatılmış konik ve köpük dolgulu ince cidarlı yapıların enerji sönümlene kabiliyeti üzerine araştırmalar yapmış ve bir ucu kapatılmış köpük dolgulu konik tüplerin enerji sönümlene kabiliyetinin, boş tüp ile köpüğün enerji sönümlene kabiliyetinin toplamından daha fazla olduğunu göstermişlerdir.

1.5. Kaynak Dikişli Tüplerin Enerji Sönümlene Özellikleri

Kaynak dikişli yapıların otomotiv endüstrisindeki uygulama alanları; ağırlığı azalttığı, çarpışma davranışını iyileştirdiği ve maliyeti azalttığı için her geçen gün yaygınlaşmaktadır [46]. Bunun için kaynak dikişli malzemeleri üretiminde yeni yöntemler geliştirilmektedir. Kaynak dikişli tüpler, genellikle ergime sıcaklıkları arasındaki farkın fazla olduğu malzemeler arasında yapıldığı için klasik kaynak metotları ile kullanılamamaktadır. Kaynak dikişli yapılar için sürtünme karıştırma kaynağı, lazer ışın kaynağı ve elektron demet kaynağı gibi ileri kaynak metotları kullanılmaktadır [47].

Özellikle çarpışma mekaniğinde büyük sorun olan pik kuvvetinin düşürülmesi, sert bir malzeme ile daha yumuşak bir malzeme kullanılarak iyileştirilmektedir. Yumuşak malzemeler daha düşük akma gerilmelerine sahip olduklarından ilk çarpışma anında düşük pik kuvvet ile deforme olmaktadır. Yumuşak malzeme tamamen deforme olduğunda sert malzeme deforme olmaya başlayacak ve bu şekilde daha kararlı bir çarpışma dayanımı elde edilecektir.



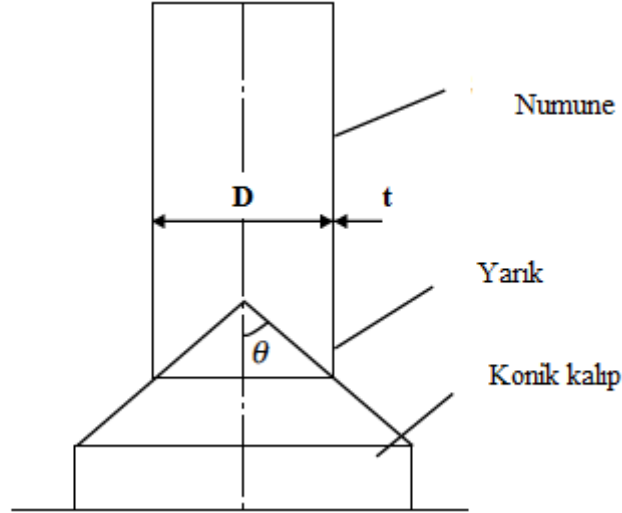
Şekil 1.5. Araçta kullanılan kaynak dikişli yapılar [47]

Kaynak dikişli tüplerin enerji sönümleyici olarak kullanılması yeni bir alandır. Bu alanda ilk çalışma Zhan ve arkadaşları [48] tarafından kaynak dikişli tüplerde kalınlık değişiminin aksel deformasyona etkisini inceledikleri araştırmasında yapmışlardır. Sonra Gedikli [49] alüminyum ve çelikten yapılmış kaynak dikişli tüplerin çarpışma davranışlarını incelediği çalışmada tüpün malzemesinin, kalınlığının ve çap-boy oranının değişiminin enerji sönümleme kabiliyetini arttırdığını göstermiştir. Gedikli [50] başka bir çalışmada kaynak dikişli ince cidarlı köpük dolgululu ve köpük dolgusuz tüplerin enerji sönümleme kabiliyetlerini optimizasyon yöntemini kullanarak sayısal olarak araştırdı. Araştırma sonucunda birim kütle başına yutulan enerji, pik kuvvet ve çarpışma kuvveti verimi değişimlerinden optimum değerler elde etmiştir.

1.6. Yarılma ile Enerji Sönümleme

İnce cidarlı tüplerin aksel yarılma ile enerji sönümleme karakteristikleri çarpışma kuvvetini daha dengeli bir formda üretmektedir. Bu kuvvet formuyla uzun yer değiştirmede etkili bir enerji sönümleme yöntemidir [51]. Yarılma ile enerji sönümleme, dairesel tüpün

üstüne kuvvet uygularken altına kıvrım oluşturacak şekilde bir kalıp koyarak gerçekleştirilir. Bazı durumlarda kıvrım engelleyici plaka kullanılarak kıvrım oluşumu engellenir ve böylece aksenal kuvvet artırılabilir. Ayrıca farklı koniklik açılı alt kalıp kullanılarak aksenal yük miktarı ayarlanabilir.



Şekil 1.6. Yarılma ile enerji sönmlemenin şematik görünümü

Abbas Niknejad ve diğerleri [52] ani darbe altındaki ince cidarlı tüplerin aksenal yük altında yarılma davranışı deneysel ve teorik olarak yaptıkları çalışmalarında et kalınlığı, tüpün iç çapı, koniklik açısı ve başlangıçta tüpteki çentik adedinin çarpma kuvvetine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, deneysel çalışmalara uygun teorik denklemler elde ederken, koniklik açısının, ilk çentik sayısının (yarık açma), tüp çapının ve et kalınlığının artması ile yarılma kuvvetinin arttığını göstermişlerdir. Huang ve arkadaşları [53] aksenal yükleme altında alüminyum ve çelik tüplerin 5 mm'lik başlangıç çentikler ve farklı açılardaki konik kalıplar ile çarpışma davranışı deneysel olarak incelemişler ve yarılma ve kalıp kullanmanın uzun yer değiştirme ve daha düzgün bir çarpışma kuvveti oluşturduğunu görmüşlerdir.

1.7. Optimizasyon Yönteminin Enerji Sönülemeye Uygulanması

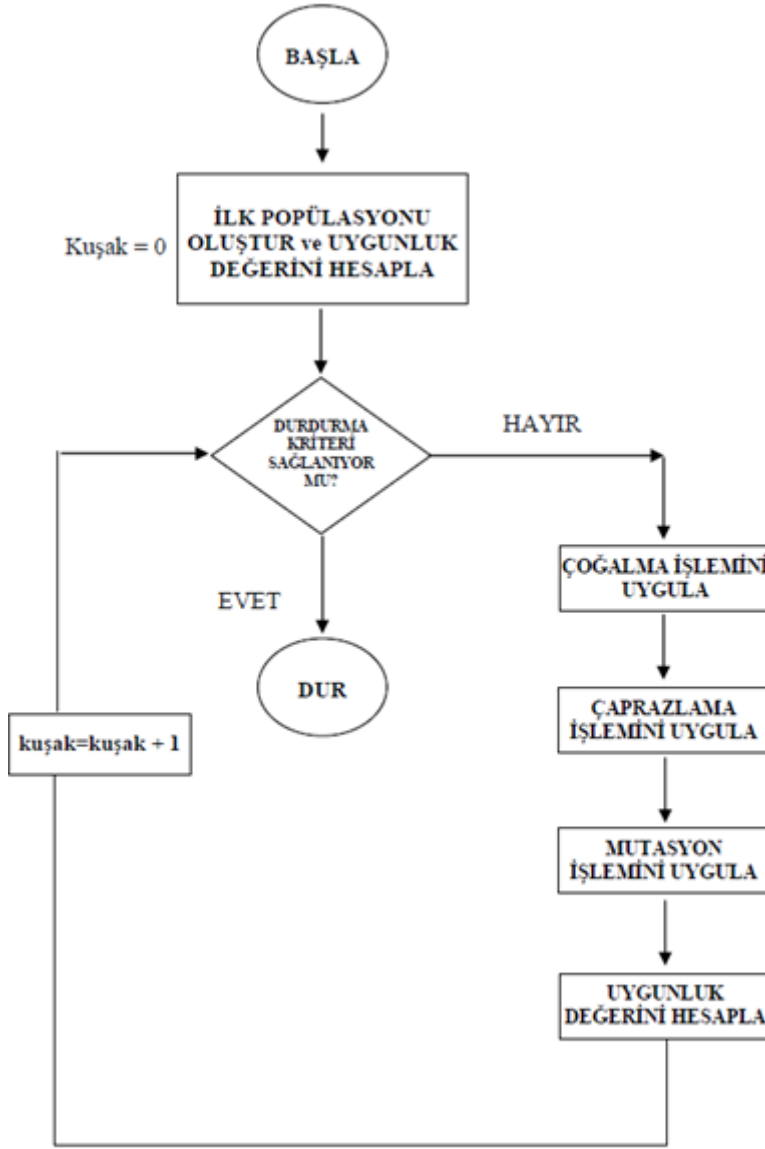
Optimizasyon, bir sistemde var olan kaynakların (işgücü, zaman, kapital, süreçler, hammaddeler, kapasite, ekipman gibi) en verimli şekilde kullanılarak belirli amaçlara (maliyet en azaltılması, kâr en çoklanması, kapasite kullanımının en yükseltilmesi ve verimliliğin en çoklanması gibi) ulaşmayı sağlayan bir teknoloji olarak tanımlanmaktadır [54]. Optimizasyonda modelleme ve çözümlenme iki önemli bileşen olarak

nitelendirilmektedir. Modelleme gerçek yaşamda karşılaşılan problemin matematiksel olarak ifade edilmesi; çözümlenme ise bu modeli sağlayan en iyi çözümün elde edilmesini kapsamaktadır.

Günümüzün karmaşık ve zor koşulları, problemlere hızlı ve kolay çözüm veren yeni çözüm yöntemleri arayışına neden olmuştur. Özellikle sert optimizasyon teknikleri yerine, yumuşak hesaplama ve doğal algoritma kullanımı ön plana çıkmıştır. Doğal yaklaşımlardan olan genetik algoritmalar da, bu arayışlar içinde önemli bir yer tutmaya başlamıştır. Uygulama başarıları artan ve sürekli geliştirilmeye çalışılan genetik algoritmalar diğer yumuşak hesaplama yöntemleri ile birlikte kullanılarak hibrid çözümler geliştirilmesine çalışılmaktadır. Genetik algoritmalar, doğal seçim ilkelerine dayanan bir arama ve optimizasyon yöntemidir. Temel ilkeleri John Holland tarafından ortaya atılmıştır [55].

Olasılık kurallarına göre çalışan genetik algoritmalar, yalnızca amaç fonksiyonuna gereksinim duyar. Çözüm uzayının tamamını değil belirli bir kısmını tararlar. Böylece, etkin arama yaparak çok daha kısa bir sürede çözüme ulaşırlar [55]. Diğer bir önemli üstünlükleri ise çözümlerden oluşan popülasyonu eş zamanlı incelemeleri ve böylelikle yerel en iyi çözümlere takılmamalarıdır. Genetik algoritmaların geleneksel optimizasyon yöntemlerine olduğu gibi yapay zeka yöntemlerine göre de çeşitli alanlarda üstünlükleri bulunmaktadır. Bu üstünlükler genetik algoritmaların arama yapısı ile ilgilidir.

Bir çok alanda uygulama imkanı olan genetik algoritmaların işleme adımları şöyle açıklanabilir [56]:



Şekil 1.7. Genetik algoritma için akış diyagramı [55]

- Arama uzayındaki tüm mümkün çözümler dizi olarak kodlanır.
- Genellikle rastsal bir çözüm kümesi seçilir ve başlangıç popülasyonu olarak kabul edilir.
- Her bir dizi için bir uygunluk değeri hesaplanır, bulunan uygunluk değerleri dizilerin çözüm kalitesini gösterir.
- Bir grup dizi belirli bir olasılık değerine göre rastsal olarak seçilip çoğalma işlemi gerçekleştirilir.
- Yeni bireylerin uygunluk değerleri hesaplanarak, çaprazlama ve mutasyon işlemlerine tabi tutulur.
- Önceden belirlenen kuşak sayısı boyunca yukarıdaki işlemler devam ettirilir.

- İterasyon, belirlenen kuşak sayısına ulaşıncaya işlem sona erdirilir. Amaç fonksiyonuna göre en uygun olan dizi seçilir.

Genetik algoritmalar bir çözüm uzayındaki her noktayı, kromozom adı verilen ikili bit dizisi ile kodlar. Her noktanın bir uygunluk değeri vardır. Tek bir nokta yerine, genetik algoritmalar bir popülasyon olarak noktalar kümesini muhafaza eder. Her kuşakta, genetik algoritma, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik operatörleri kullanarak yeni bir popülasyon oluşturur. Birkaç kuşak sonunda, popülasyon daha iyi uygunluk değerine sahip üyeleri içerir. Genetik algoritmalar, çözümlerin kodlanmasını, uygunlukların hesaplanmasını, çoğalma, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin uygulanmasını içerir.

1.8. Tezin Konusu ve Amacı

Bu çalışmanın konusu farklı malzemelerden yapılmış (Al6063, St52, Al6063&St52) tüplerin enerji sönmleme karakteristiğini farklı alt kalıp açılara (0°, 15°, 30°, 45°) göre hem sayısal ve deneysel hem de statik ve dinamik olarak incelemektir. Bununla beraber kaynak dikişli içi boş ve köpük dolgulu farklı konikliklere ($\alpha = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ ve 15°) sahip konik tüplerin enerji sönmleme kabiliyetlerini optimizasyon yöntemleri ile araştırmaktır. Çalışmanın amacı ise farklı yapılar kullanarak ince cidarlı tüplerin enerji sönmleme kabiliyetlerini, pik kuvveti ve çarpma kuvveti davranışını belirleyip geliştirmektir. Buna yönelik deney ve sayısal çözüm yöntemleri olan sonlu elemanlar yöntemi ile düzgün parçacık hidrodinamiği metodu kullanılmıştır.

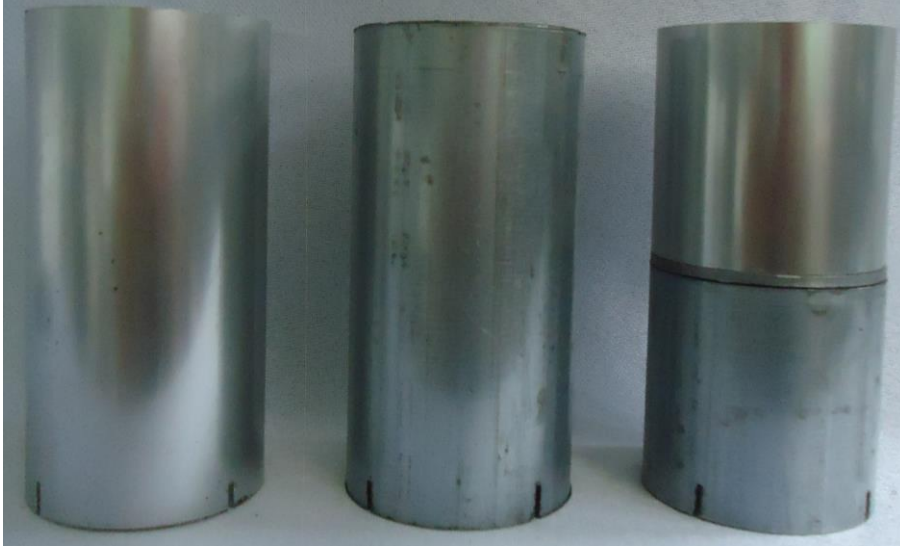
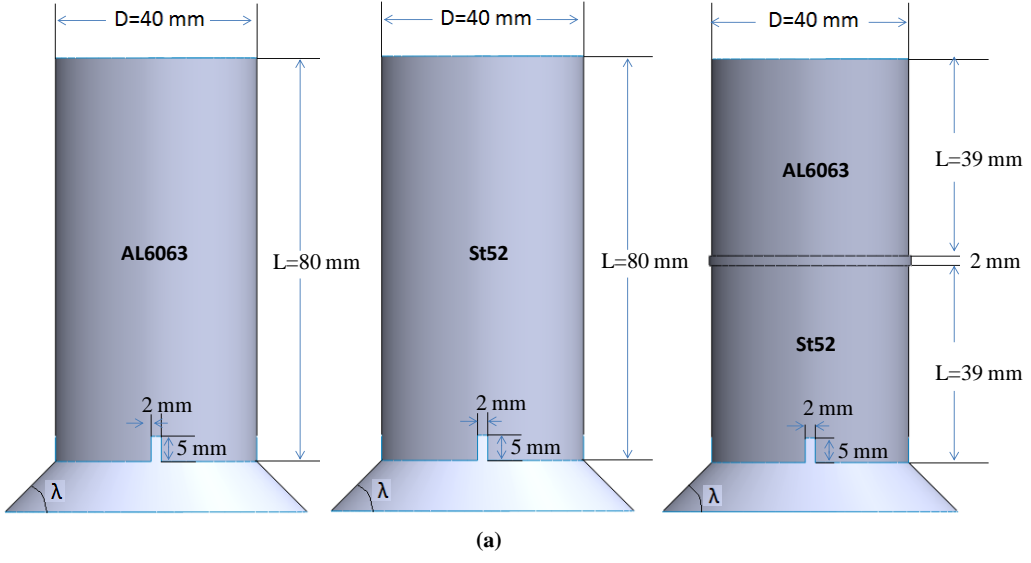
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez kapsamında deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Farklı malzemelerden yapılmış (Al6063, St52, Al6063&St52) tüplerin enerji sönümlene karakteristiğini farklı alt kalıp açılarına (0°, 15°, 30°, 45°) göre hem sayısal ve deneysel hem de statik ve dinamik olarak incelenmiştir. Ayrıca farklı konikliklere (0°, 5°, 10°, 15°) sahip kaynak dikişli tüpler köpük dolgulu ve boş olarak modellenip sayısal analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde üst parçanın et kalınlığı ve köpük yoğunluğu parametrik tanımlanıp LS-OPT programı kullanılarak optimize edilmiştir.

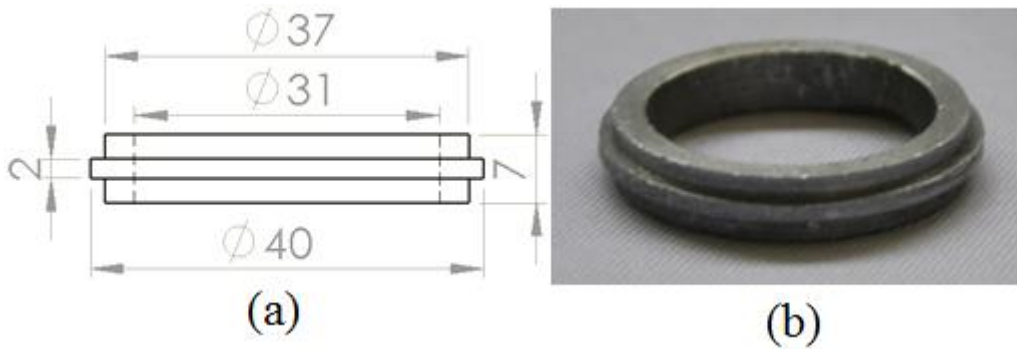
2.1. Deneysel Çalışmalar

2.1.1. Düz Tüp, Alt Kalıp Geometrileri ve Malzeme Özellikleri

Deneysel çalışmalar statik ve dinamik (çarpma) testler adı altında iki farklı yükleme tipinde gerçekleştirildi. Numuneler; 1.5 mm cidar kalınlığında, 40 mm çapında ve toplamda 80 mm uzunluğunda olacak şekilde hazırlanmıştır. Şekil 2.1' de görülen deney numuneleri; 80 mm uzunluğunda Al6063, 80 mm uzunluğunda St52 malzemedan ve 39 mm uzunluklu Al6063 ve 39 mm uzunluklu St52 malzemelerinden oluşturulmuştur. Son tip numunelerde Şekil 2.2' de verilen 2 mm kalınlığa sahip ara aparat kullanıldı. Ara aparat kullanılmasının nedeni alüminyum ve çelik gibi farklı malzemelerin kaynak edilmesinde karşılaşılan zorluklardır. Bu aparat yardımı ile alüminyum ve çelik numuneler birbirine sıkı bir şekilde bağlanmıştır. Deney numunelerinin alt uç kısımlarına 5 mm uzunluğunda ve 2 mm genişliğinde eşit açılı dört adet çentik açılmıştır. Ayrıca Şekil 2.3' de verilen farklı açılara (0°, 15°, 30°, 45°) sahip alt kalıplar üretilmiştir.



Şekil 2.1. Deney numunelerinin geometrik (a) özellikleri ve (b) görünümü



Şekil 2.2. Ara aparat (a) ölçüsü ve (b) görünümü



Şekil 2.3. Alt kalıplar;(a) 0° , (b) 15° , (c) 30° ve (d) 45°

2.1.2. Statik Deneyler

Statik deneyler genel olarak 0.0015 m/s ile 0.1 m/s'ye kadar olan düşük deformasyon hızlarında gerçekleştirilirler. Bu testlerde deformasyon hızları düşük olduğundan deformasyon sertleşmesi etkisi genelde görülmez. Statik deneyler Karadeniz Teknik Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Bölümü'nün laboratuvarlarında bulunan MTS Criterion 45 Serisi Elektromekanik Üniversal Test Sistemi ile yapıldı. Sistem MTS Test Suite TW yazılımı içermekte ve testler bu program vasıtasıyla bilgisayar kontrollü olarak yapılmaktadır. Bu sistemin genel görünümü Şekil 2.5'de verilmektedir. Numune alt çeneye yerleştirilir, üst çene hareket ettirilerek numuneye kuvvet uygulamayacak şekilde yaklaştırılır. Statik testler, 0.00025m/s üst çene hızında başlatılmış ve deformasyon mesafesi 52 mm ye kadar devam ettirilmiştir. Tablo 2.1' de verildiği gibi farklı kalıp açıları ($\lambda=0^{\circ}$, $\lambda=15^{\circ}$, $\lambda=30^{\circ}$, $\lambda=45^{\circ}$), farklı malzemeler (Al6063, St52, Al6063&St52) için toplam da 12 adet statik deney yapılmıştır. Deneyler sonucunda; zaman, kuvvet ve yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.

Tablo 2.1. Tüpler için yapılan statik deney özellikleri

Kalıp Açısı (λ)	Malzeme	Tüp uzunluğu (mm)	Üst Çene Hızı (m/s)
a) 0°	Al6063	80	0.00025
b) 15°	St52	80	
c) 30°	Al6063& St52	39& 39	
d) 45°			

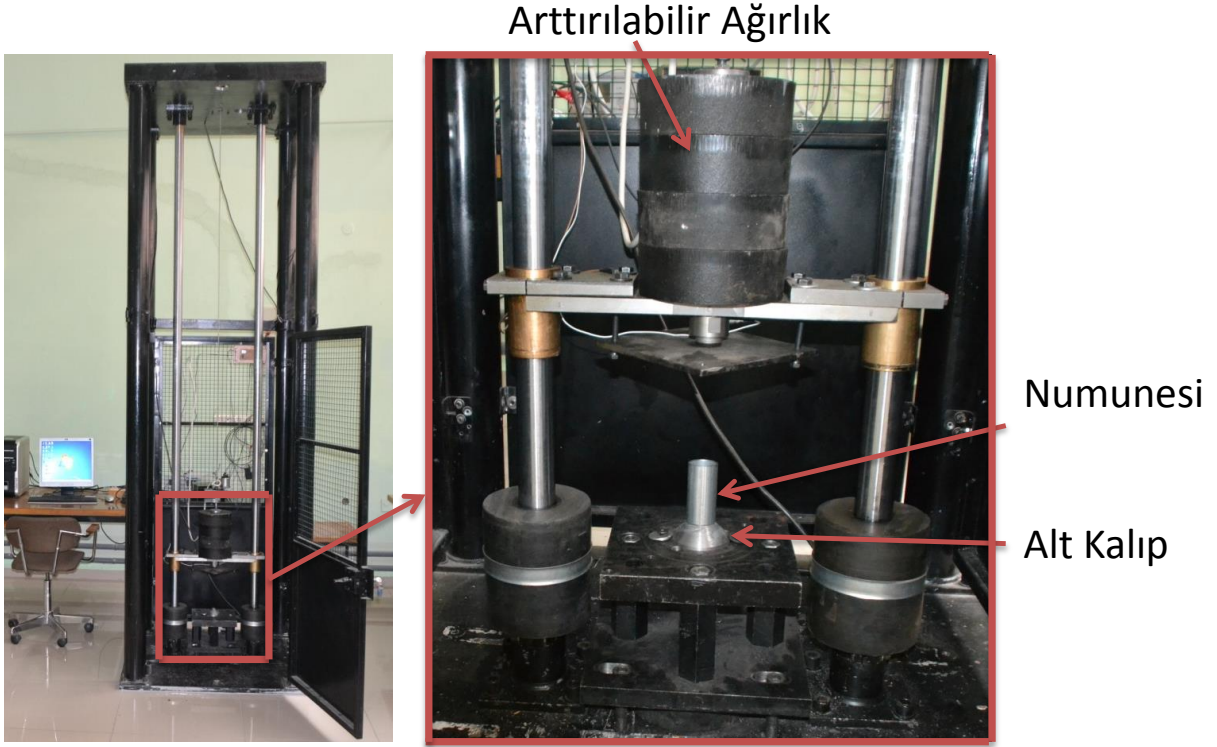


Şekil 2.4. MTS Criterion 45 serisi üniversal test sistemi

2.1.3. Dinamik Deneyler

Dinamik deneyler, malzemelerin enerji sönümlenme kabiliyeti ve hasar davranışlarını dinamik şartlarda anlamak için yapılır. Bu deneyler genellikle bir kütlenin belirli bir yükseklikten serbest bırakılması veya atış testleri gibi şartlandırılarak yapılırlar.

Dinamik deneyler, Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik laboratuvarında bulunan ve Şekil 2.6' da verilen serbest düşme deney sistemi ile gerçekleştirildi. Deney sisteminde hem plakaların delinme testleri hem de tüplerin hasar testleri çarpma uç değişimi yapılarak gerçekleştirilebilmektedir. Sistemde serbest düşen kütle 15 kg' dan 60 kg' a kadar değişebilirken hızı da maksimum 6.5 m/s'ye çıkabilmektedir. Çarpma anındaki kuvvet ve ivme değerleri sistem üzerindeki algılayıcılar vasıtasıyla ölçülerek uygun bir yazılımla kalibre edilmektedir.



Şekil 2.5. Serbest düşme test sistemi

Dinamik testler (deformasyon deneyleri), alt zemine sabitlenmiş ve Şekil 2.4'te görülen farklı açılardaki alt kalıplar üzerine tüplerin yerleştirilmesiyle gerçekleştirildi. Dinamik deneyler Tablo 2.2'de verilen özellikler için toplam 12 adet olarak yapıldı.

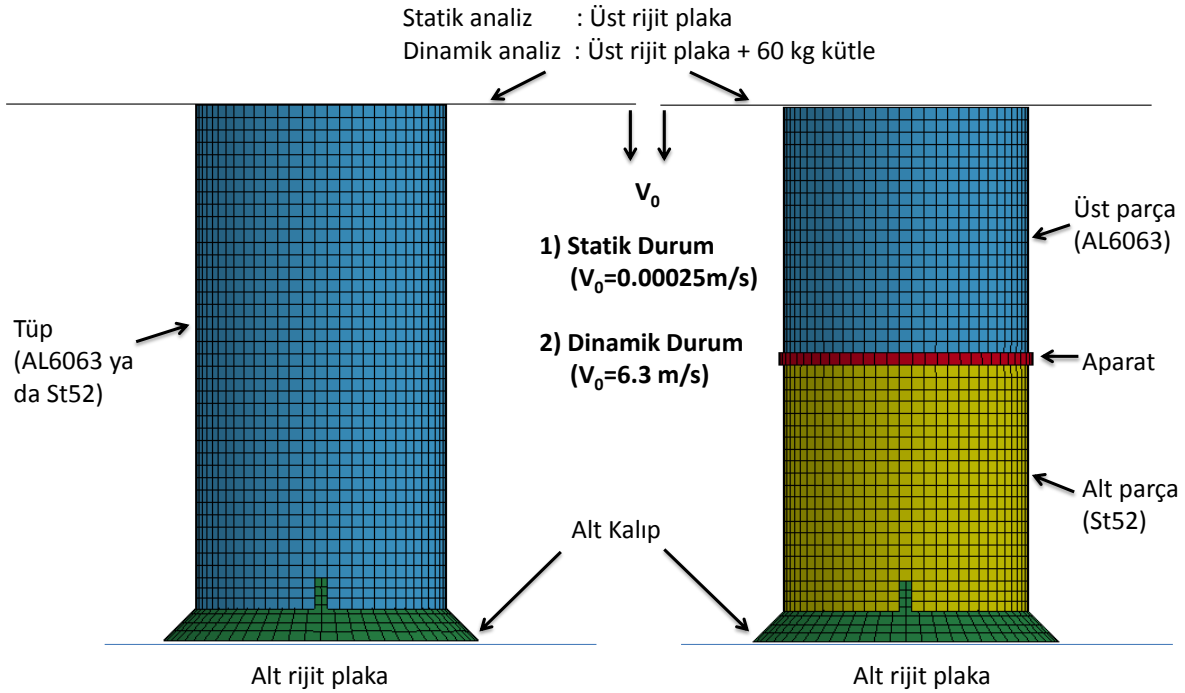
Tablo 2.2. Tüpler için yapılan dinamik deney özellikleri

Kalıp Açısı (λ)	Malzeme	Tüp uzunluğu (mm)	Üst Çene Hızı (m/s)
a) 0°	Al6063	80	6.3
b) 15°	St52	80	
c) 30°	Al6063& St52	39 & 39	
d) 45°			

2.2. Sayısal Çalışmalar

2.2.1. Düz Tüplerin Statik Analizi

Statik analizler; alt kalıp açıları 0° , 15° , 30° , 45° için Al6063, St52 ve özel bir aparat yardımı ile birleştirilen Al6063&St52 malzemeli tüpler için yapıldı. Şekil 2.6'da verildiği gibi problemin üç boyutlu geometrisi yüzey şeklinde oluşturulmuştur. Üst çene, rijit plaka şeklinde; alt kalıplar ise yüzey şeklinde oluşturulmuştur. Solidwork programında oluşturulan çizimler kontrollü ağ oluşturmak için Hypermesh programında açılmıştır. Bütün tüp yüzeyleri dörtkenarlı $2 \times 2 \text{ mm}^2$ düzgün kabuk (Shell) ağ yapısıyla modellenirken üst rijit plaka $8 \times 8 \text{ mm}^2$ kabuk elemanla modellenmiştir. Alt kalıpta 15° , 30° ve 45° için 600 eleman kullanıldı. Sonrasında Şekil 2.6'daki gibi ağ yapısı oluşturulan problem, sayısal analizlerin yapılacağı Ls-dyna programında açılmış ve gerekli kartlar doldurularak analize hazır hale getirilmiştir.



Şekil 2.6. Düz tüplerin sol elemanlar modeli

Sayısal analizlerde Johnson-Cook (*MAT 15) malzeme modeli kullanılmıştır. Johnson-Cook malzeme modeli sıcaklık, deformasyon sertleşmesi ve büyük deformasyon hızlarına maruz malzemeleri başarılı bir şekilde modelleyebilmektedir [57]. Bu modelde gerilme;

$$\sigma_0 = \left[A + B \left(\varepsilon_p^n \right) \right] \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_R}{T_M - T_R} \right)^m \right) \quad (2.1)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. Burada A , B , C , n ve m Johnson-Cook malzeme modelindeki sabitler; T_M , T_R , ρ ve ε_p sırasıyla; ergime sıcaklığı, oda sıcaklığı, yoğunluk ve etkin plastik şekil değiştirir. Al6063 ve St52 için Johnson-Cook malzeme sabitleri Tablo 2.3' de verilmiştir. Üst rijit plakanın malzeme modeli için *MAT_RIGID kartı kullanılmışken *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID kartı ile eksi y-ekseni yönünde 0.015 m/s'lik sabit çene hızı tanımlanmıştır. Üst rijit plaka ile tüp ve tüp ile kalıp arasındaki temas için *CONTACT_NODES_TO_SURFACE temas kartı kullanılmıştır. Statik ve dinamik sürtünme katsayıları sırasıyla 0.2 ve 0.1 olarak alınmıştır. Ayrıca tüpün kendi kendine teması için ise *AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Problemin sonlu elemanlar modelinde kullanılan tüm deforme olabilir bölgelerdeki kabuk elemanlarda 9 integrasyon noktalı Belytschko-Tsay Shell eleman formülasyonu kullanılmıştır.

*MAT_ADD_EROSION kartı tanımlanarak maksimum şekil değiştirmesi 0.1 değerine ulaşan elemanların silinmesi sağlanmıştır. Böylece maksimum şekil değiştirme değerlerine ulaşan elemanlar silinerek çatlağın ilerlemesi sağlanmıştır.

Tablo 2.3. Al6063 ve St52 malzemelerinin lineer elastik özellikleri ve Johnson-Cookmalzeme sabitleri

Malzeme	Johnson-Cook Malzeme Sabitleri					Lineer Malzeme Özellikleri		
	A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	E (MPa)	ρ (kg/m ³)	ν
Al6063	159.28	111.87	0.011	0.350	-	72	2700	0.3
St52	286	147.95	0.0476	0.282	-	200	7800	0.3

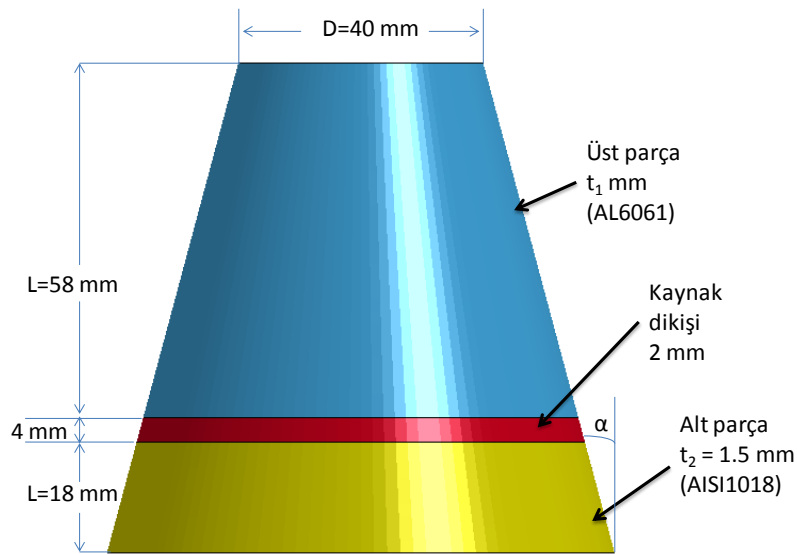
2.2.2. Düz Tüplerin Dinamik Analizi

Dinamik analizlerin sonlu elemanlar modeli, statik analizlerde kullanılan model referans alınarak geliştirildi. Johnson-Cook (*MAT 15) malzeme modeli ve sabitleri hem statik hem de dinamik analizlerde aynı kullanıldı (Tablo 2.2). Bununla birlikte dinamik analizlerde *ELEMENT_MASS kartı ile üst rijit plakaya 60 kg'lık (çarpan kütle) bir kütle tanımlanmış ve ayrıca *INITIAL_VELOCITY_RIGID_BODY kartı ile 6.3 m/s'lik çarpışma hızı üst rijit plakaya uygulanmıştır.

2.2.3. Konik Boş ve Konik Dolgulu Tüplerin Dinamik Analizi

Bu bölümde içi boş ve köpük dolgulu ve dairesel kesitli konik tüplerin çarpma yükü altında dinamik davranışları sayısal olarak incelendi. Analizlerde tüplerin enerji sönmleme özellikleri, pik kuvvet ve kuvvet verimliliği özellikleri belirlendi.

Şekil 2.7' de verilen konik tüpler iki farklı malzemenin (AISI1018&Al6061) ileri kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Kaynak bölgesi 4 mm genişliğinde ve üst uçtan 60 mm (0.75L) aşağıda olduğu varsayılmıştır. Konik tüplerin toplam uzunluğu 80 mm, üst uç çapı sabit 40 mm ve koniklik açısı, $\alpha = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ ve 15° olacak şekilde seçilmiştir. Ayrıca alt parça kalınlığı (t_1) sabit ve 2.5 mm alınırken üst parçanın kalınlığı (t_2) ise 0.5 mm ile 2.5 mm arasında değişken alınmıştır.



Şekil 2.7. Konik tüplerin geometrik görünümü

Sonlu eleman analizlerinde Johnson-Cook malzeme modeli AISI1018, Al6061 ve AISI1018&Al6061 malzemeli tüpler için kullanıldı. Bu değerler Tablo 2.4' de verilmiştir [58-59].

Tablo 2.4. Al6061, AISI1018 ve Al6061&AISI1018 malzemelerinin lineer elastik özellikleri ve Johnson-Cook malzeme sabitleri

Malzeme	Johnson-Cook Malzeme Sabitleri					Lineer Malzeme Özellikleri		
	<i>A</i> (MPa)	<i>B</i> (MPa)	<i>C</i>	<i>n</i>	<i>m</i>	<i>E</i> (MPa)	ρ (kg/m ³)	ν
Al6061	289.6	203.4	0.011	0.350	1.34	72	2850	0.3
AISI1018	520	269	0.0476	0.282	0.553	200	7850	0.3
Al6061&AISI1018	381.8	229.6	0.0256	0.323	1.136	123.2	4850	0.3

Kaynak dikişinin mekanik özellikleri denklem 2.2'deki karışım kuralı kullanılarak türetilmiştir. Bu denklemde kaynak bölgesinde, AISI1018 malzemenin Al6063 malzemeye göre daha az nüfuz ettiği varsayılmıştır [60].

$$X_K = 0.6_{X_{AL}} + 0.4_{X_{ST}} \quad (2.2)$$

Burada “K, AL, ST” kısaltmaları sırasıyla kaynak dikişini, alüminyum ve çelik malzemelerini göstermektedir.

Analizler, içi boş tüpler ve içi metalik köpük dolgulu tüpler için yapılmıştır. Analizlerdeki köpüğün yoğunluğunun 100 kg/m³ ile 800 kg/m³ aralığında değiştiği varsayılmıştır. Köpük için plato bölgesi mekanik özelliklerin belirlenmesinde çok önemlidir ve bu bölgede gerilme değeri köpük yoğunluğuna bağlı olarak denklem 2.3'deki gibi hesaplanır.

$$\sigma_p = C \left(\frac{\rho_{KOPUK}}{\rho_0} \right)^m \quad (2.3)$$

Burada σ_p plato bölgesi gerilme değeri, ρ_{KOPUK} köpük yoğunluğu, C ve m malzeme sabitleridir.

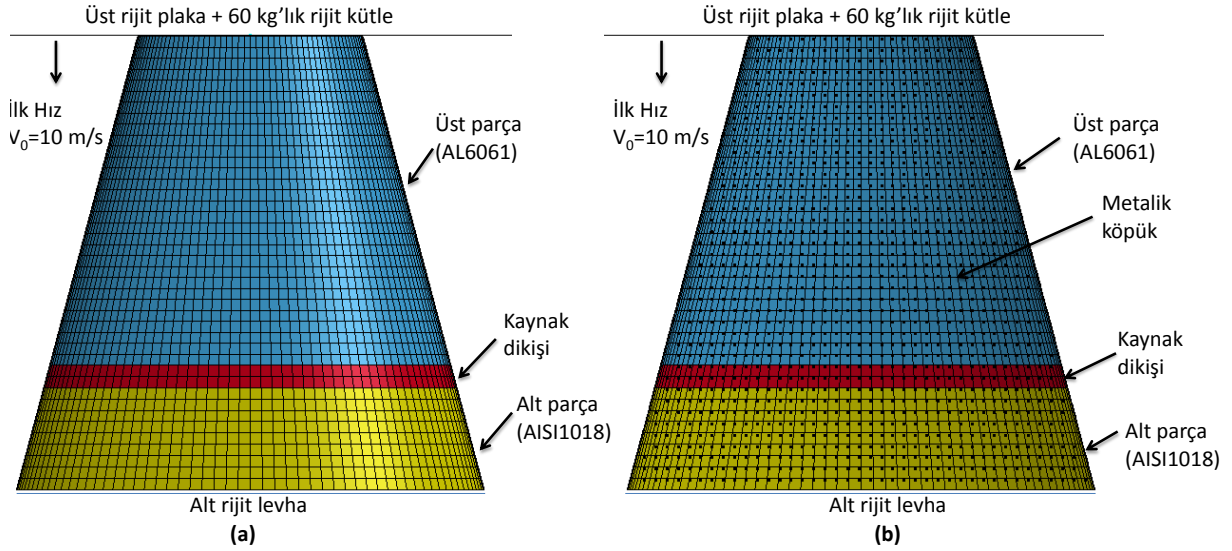
Köpük malzeme modelleri arasından *CRUSHABLE FOAM (*MAT 63) modeli seçildi. Bu modelde köpük için Young modülü $E=63.75$ GPa ve poisson oranı 0.0 olarak alındı. Köpük malzemesi için özellikler Tablo 2.5'de verilmektedir [50]. Köpük malzemenin modellenmesi için Düzgün Parçacık Hidrodinamiği (Smooth Particle Hydrodynamics) kullanılmıştır.

Tablo 2.5. Alüminyum köpüğe ait şekil değiştirme-gerilme değerleri

Şekil değiştirme	0	σ_p/E	0.6	0.7	0.75	0.8
Gerilme	0	σ_p	σ_p	$1.35 \sigma_p$	$5\sigma_p$	$0.05 E$

Şekil 2.8' de içi boş ve köpük dolgulu kaynak dikişli tüplerin sonlu elemanlar/SPH modeli verilmektedir. Boş tüpler için ise sadece sonlu elemanlar yöntemi uygulanmış ve sonlu elemanlar modelinde tüplerin tüm bölgeleri için (üst parça, kaynak bölgesi ve alt parça) 9 integrasyon noktalı Belytschko-Tsay Shell eleman formülasyonu kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modelinde kabuk eleman boyutu 2 mm x 2 mm alınırken, SPH modelinde noktalar arası mesafe sabit ve 2 mm alınmıştır.

Bu çalışmada model için iki çeşit temas algoritması uygulanmıştır. Bunlardan biri olan *AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE, analiz sırasında tüpün kendi içine geçişleri önlemek için kullanılmıştır. Diğer temas algoritması olarak *CONTACT_NODE_SURFACE kartı; tüp-köpük, tüp- üst rijit plaka ve üst rijit plaka-köpük ara yüzleri için tanımlanmıştır. Burada statik ve dinamik sürtünme katsayıları sırasıyla 0.2 ve 0.1 alınmıştır. Çarpma hızı 10 m/s olarak *INITIAL_VELOCITY_RIGID_BODY kartı ile modele tanımlanmıştır.



Şekil 2.8. Boş (a) ve köpük dolgulu (b) tüp için sonlu elemanlar- SPH modeli

2.2.4. Konik Boş ve Dolgulu Tüplerin Optimizasyonu

Bu çalışmada optimizasyon çalışması için özgül enerji sönmüleme (SEA), pik kuvveti (F_{pik}), ortalama kuvveti (F_{ort}) ve çarpma kuvveti verimliliği (CFE) çarpma performansı kriterleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$SEA = \frac{E_{TOPLAM}}{M_{TOPLAM}} = \frac{\int_0^{\Delta} F(u) du}{M_{TOPLAM}} \quad (2.4)$$

$$F_{ort} = \frac{E_{TOPLAM}}{\Delta} \quad (2.5)$$

$$CFE = \frac{F_{ort}}{F_{pik}} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} M_{TOPLAM} = & \rho_{AL} t_1 \pi [38.5 + 58 \tan \alpha] 58 \sin \alpha \\ & + \rho_K t_K \pi [38.5 + 120 \tan \alpha] 4 \sin \alpha \\ & + \rho_{ST} t_2 \pi [38.5 + 142 \tan \alpha] 18 \sin \alpha \\ & + \frac{80}{3} \rho_{KOPUK} \pi \left[18.75^2 + 18.75(18.75 + 80 \tan \alpha) + 80^2 \tan^2 \alpha \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

Burada E_{TOPLAM} toplam sönümlenen enerjiyi, $F(u)$ aksenal çarpma kuvvetini, M_{TOPLAM} köpük dolgulu ve boş tüpün toplam kütleini, t_1 üst parçanın (Al6061) kalınlığını, t_K kaynak dikişinin kalınlığını, t_2 alt parçanın (AISI1018) kalınlığını göstermektedir. ρ_{AL} , ρ_{ST} , ρ_K ve ρ_{KOPUK} sırasıyla üst parça, alt parça, kaynak ve köpük yoğunluğunu göstermektedir. Boş tüpler için $\rho_{\text{KOPUK}}=0$ 'dır.

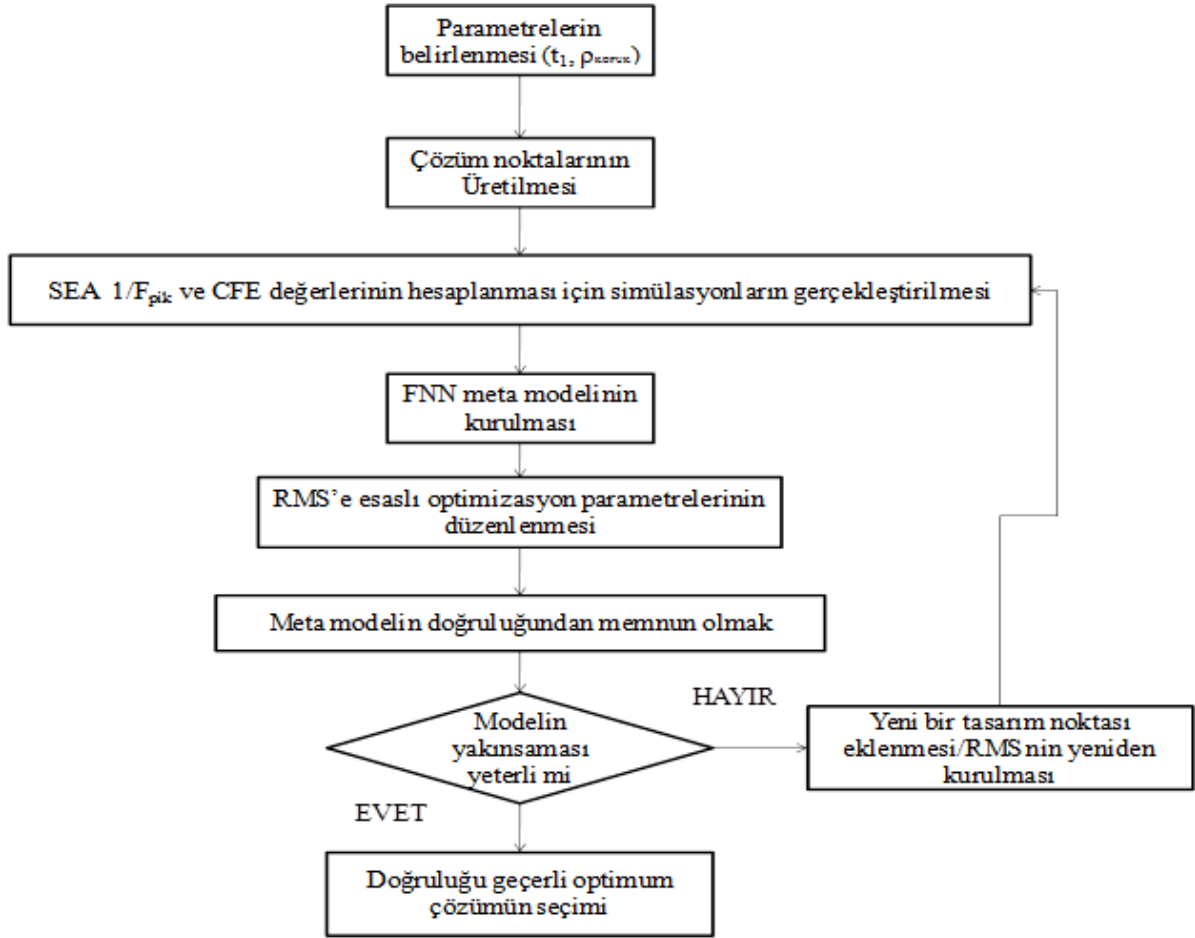
Çarpma esnasında aşırı yüksek pik kuvveti (F_{pik}), ortalama kuvvet (F_{ort}) ve maksimum kuvvet (F_{mak}) hayatı önem taşır. Bu yüzden başlangıç pik kuvvetin düşük olması istenirken SEA ve CFE' nin yüksek olması istenir [61, 62, 63].

Bu çalışmada SEA, $1/F_{\text{pik}}$ ve CFE değerlerini maksimize edebilecek en iyi üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğu aranmıştır. Burada et kalınlığı (t_1) 0.5mm ve 2.5 mm, köpük yoğunluğu (ρ_{KOPUK}) ise 100 kg/m^3 ile 800 kg/m^3 arasında alınmıştır. Problemin optimizasyon modelinde kullanılan çeşitli parametreler Denklem 2.8'de, akış şeması ise Şekil 2.9'da gösterilmiştir.

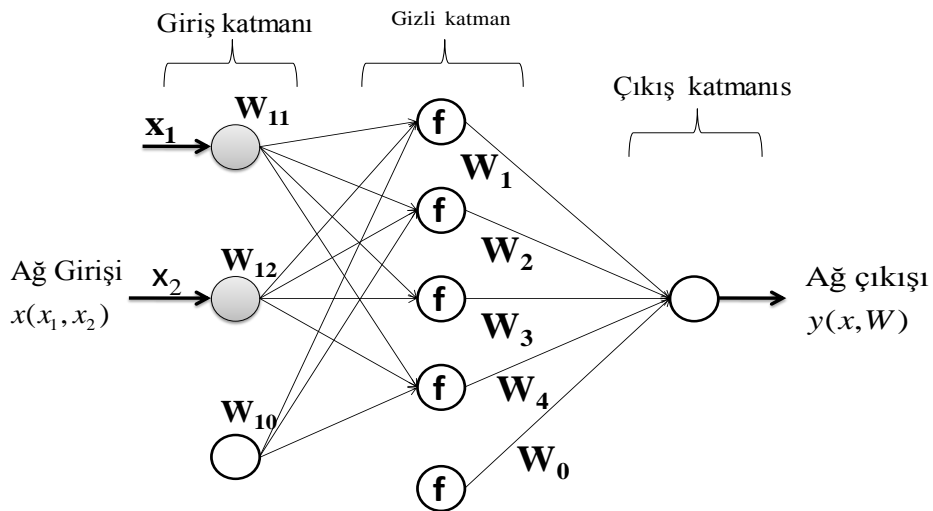
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max} \left(\text{SEA}(t_1, \rho_{\text{KOPUK}}); \frac{1}{F_{\text{pik}}}(t_1, \rho_{\text{KOPUK}}); \text{CFE}(t_1, \rho_{\text{KOPUK}}) \right) \\ \text{KISITLAYICILAR} \left\{ \begin{array}{l} F_{\text{pik}}(t_1, \rho_{\text{KOPUK}}) \leq 70 \text{ kN} \\ F_{\text{Max}}(t_1, \rho_{\text{KOPUK}}) \leq 200 \text{ kN} \\ 0.5 \text{ mm} \leq t_1 \leq 2.5 \text{ mm} \\ 100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \leq \rho_{\text{köpük}} \leq 800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{array} \right. \end{array} \right\} \quad (2.8)$$

Yapay sinir ağları doğrusal olmayan problemlerin modellenmesinde güçlü bir araçtır. Bu çalışmada tüplerin analizi için ileri beslemeli sinir ağları (FNN) kullanılmıştır. Yapay sinir ağları analizinde sunulan veriler eğitim ve test olarak ikiye ayrılmaktadır. Eğitim kısmı ağı eğitmek için kullanılmaktadır. Test kısmında ise eğitilen ağın performansı belirlenmektedir. Bu nedenle bu problem için en iyi ağın seçimi test kısmına aittir. Bu yüzden yapay sinir ağları, optimizasyon analizlerinde yaklaşım fonksiyonları için bir vekil model olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.10'da gösterildiği gibi ileri yapay sinir ağları yönteminde her bir

birim kendi girişlerinin etkilenmiş ağırlıklarını toplarlar (Denklem 2.9) ve çıkış üretebilmek için bu değerleri bir transfer fonksiyonu (Denklem 2.10) yardımıyla sonraki birime iletirler.



Şekil 2.9. Boş ve köpük dolgu tüpler için optimizasyon akış şeması



Şekil 2.10. İki girişli yapay sinir ağı

Şekil. 2.10'da f aktivasyon fonksiyonuna sahip ve iki girişli kapalı gizli katmanlı şematik bir sinir ağı göstermektedir. Ara (gizli) tabaka genelde sigmoid fonksiyondur, giriş ve çıkış birimleri ise genelde lineer olmaktadır.

$$\hat{y}(x, W) = W_0 + \sum_{h=1}^H W_h f(W_{h0} + \sum_{k=1}^K W_{hk} x_k) \quad (2.9)$$

$$f(x) = 1/1 + e^{-x} \quad (2.10)$$

Burada $f(x)$ aktivasyon fonksiyonudur

Tablo 2.6. Boş ve dolu tüplerde optimizasyon işleminde kullanılan örnekler ve malzeme özellikleri

	Örnekler	Üst parça	Köpük
BOŞ	1	0.5	100
	2	1.8	449
	3	0.5	503
	4	0.5	800
	5	2.5	598
	6	2.5	288
	7	1.9	800
	8	1.1	302
	9	1.2	651
	10	1.8	120
KÖPÜK DOLGULU	1	0.5	0
	2	1.8	0
	3	0.5	0
	4	0.5	0
	5	2.5	0
	6	2.5	0
	7	1.9	0
	8	1.1	0
	9	1.2	0
	10	1.8	0

Örnek noktalarının üretimi için tasarım alanında amaç ve kısıt fonksiyonlarını formüleştirmesi gerekir. Örnek noktaları üretmek ikinci derece yaklaşım için en az 3^n (n

değişken sayısı) noktaya sahip, düzenli bir şebekeden oluşan, faktöriyel tasarımı kabul etmektedir. Bu çalışmada üst parçanın kalınlığı ve köpük yoğunluğu gibi iki değişken seçildiğinden örnek sayısı 10 ($>3^2$) olarak alınmıştır. Her bir L_0/L değeri için kullanılan boş ve dolu tüplerdeki numune noktaları ve bunların malzeme özellikleri (üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğu) Tablo 2.6'da verilmiştir.

Seçilen örnek sayısı yapay sinir ağları modelinin doğrulunu değerlendirmek için yeterli olmayabilir. Bu nedenle modelin doğruluğunun değerlendirilmesi için sayısal tahminci (R-square) R^2 denklemi kullanılmıştır (2.11). Bu tahmin hedef değerdeki toplam varyansa göre göreceli bir varyanstır ve regresyon analizlerinde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Gösterge değeri 1 (bir) ise hedeflenen ile çıkan sonuç arasında mükemmel bir tutarlılık vardır demektir.

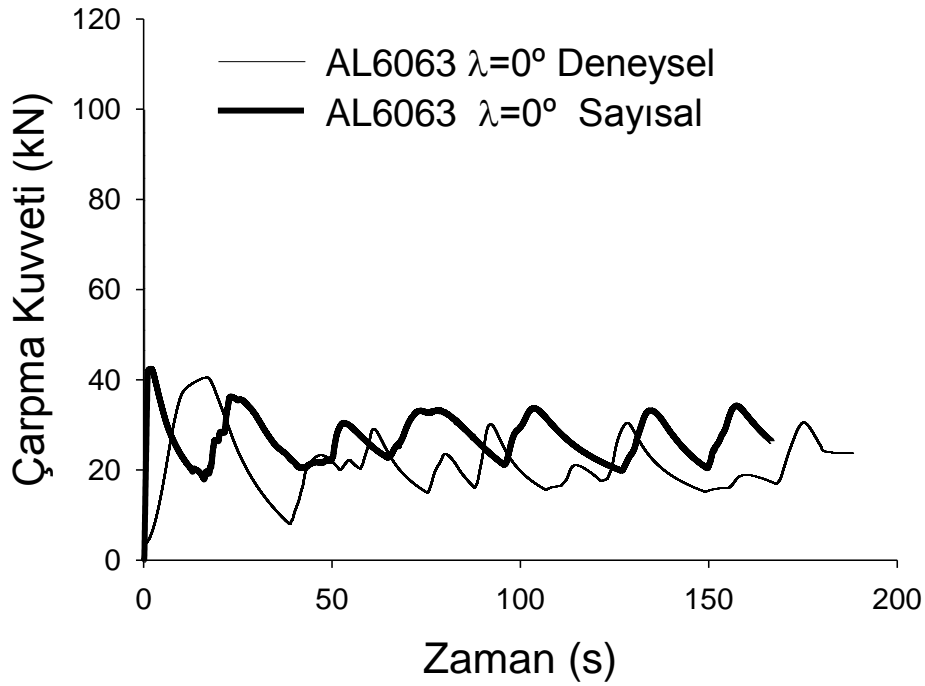
$$R^2 = \sum_i^P \frac{(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_i^P (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.11)$$

Burada P örnek sayısını, \hat{y}_i gözlenen değeri, \bar{y} tahmin edilen değeri, y_i esas değeri göstermektedir [12].

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Düz Tüplerin Statik Kuvvet Zaman Grafikleri

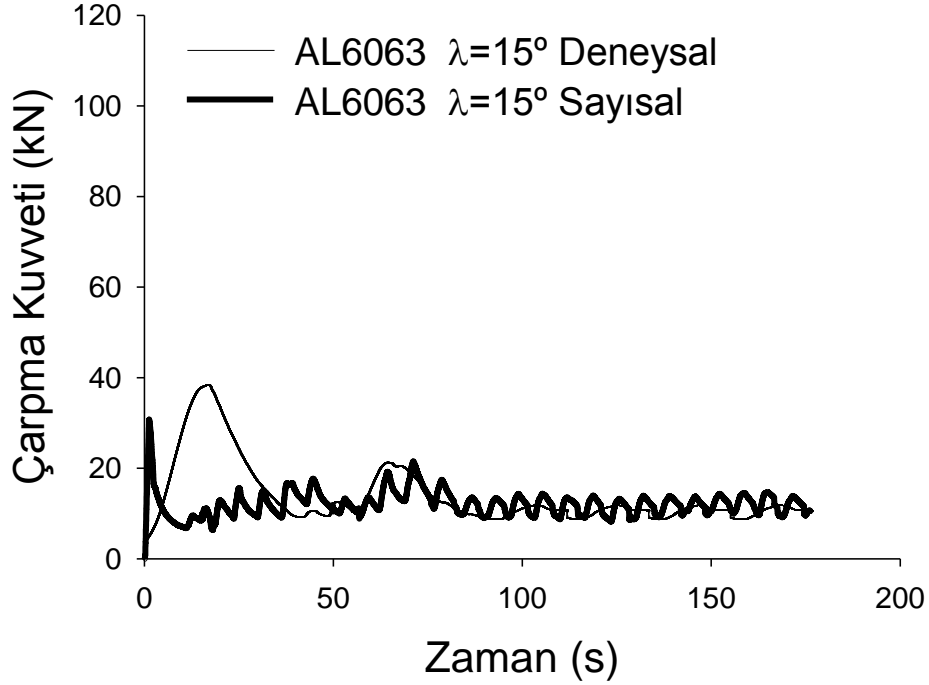
Şekil 3.1'de alt kalıp açısı 0° olan Al6063 tüplerin sayısal ve deneysel çarpma kuvveti-zaman grafikleri verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi pik kuvvetler, deneysel sonuçta 16.46'ncı saniyede ve 41.35 kN olarak gerçekleşirken sayısal analizde 2.07'nci saniyede ve 43.06 kN olmuştur. İlk halka oluşumundan sonra kuvvet ikinci halkanın oluşumuna kadar düşmüş ve ikinci halka oluşum başlangıcında tekrar artmaya başlamıştır. Bu davranış bütün halka oluşumları için benzer şekilde gerçekleşmektedir.



Şekil 3.1. Alt kalıp açısı 0° olan Al6063 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği

Şekil 3.2'de ise alt kalıp açısı 15° olan Al 6063 tüplerin statik durumda elde edilen çarpma kuvveti-zaman grafikleri görülmektedir. 16.50'inci saniyede deney için pik kuvvet 38.70 kN olarak gerçekleşirken sayısal analiz için pik kuvvet 1.3'üncü saniyede ve 30.57 kN olarak gerçekleşmiştir. İlk pik kuvvet oluşuktan sonra tüp 5 mm' lik çentiklerin ve kalıbın

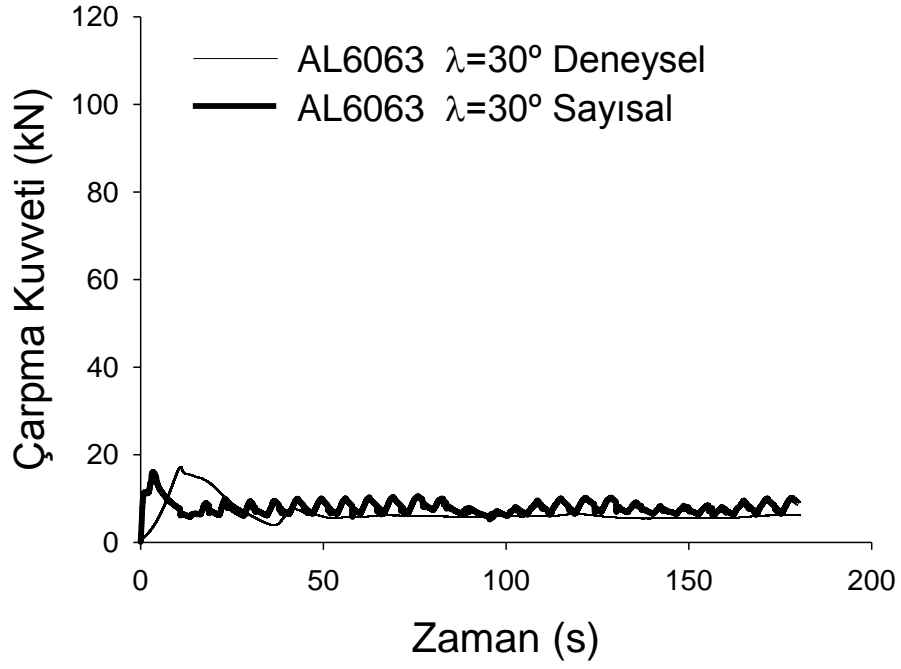
etkisi ile kıvrılmaya başlamış ve bu andan sonra çatlak ilerlemesi ile de enerji sönümlenmesi gerçekleşmiştir.



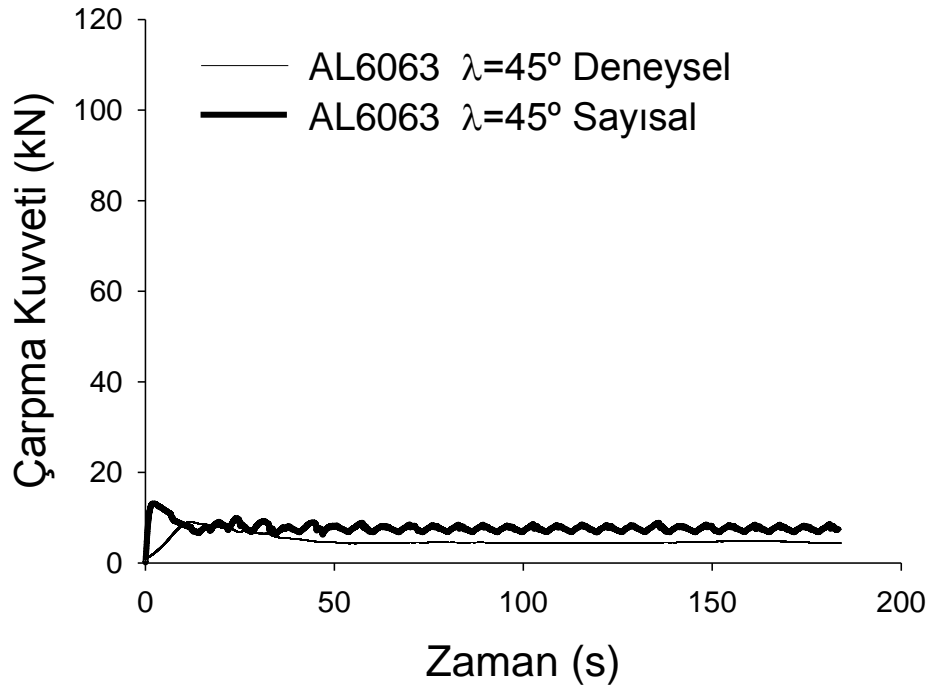
Şekil 3.2. Alt kalıp açısı 15° olan Al6063 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği

Şekil 3.3'de ise Al6063'den yapılmış, alt kalıp açısı 30° olan tüplerin statik durum için deney ve sayısal analizde çarpma kuvveti-zaman grafikleri verilmektedir. Grafikten görüldüğü gibi pik kuvvet deney için 10.65'inci saniyede 17.50 kN olurken sayısal analiz için 4.42'nci saniyede ve 16.05 kN olmuştur. Alt kalıp açısı artışıyla pik kuvveti düşmüştür. Büyük kalıp açısı tüpteki kıvrım oluşumunu kolaylaştırmış ve daha düşük bir pik kuvvet ortaya çıkmasına neden olmuştur

Şekil 3.4'te alt kalıp açısı 45° olan Al 6063 tüplerin statik durumda elde edilen çarpma kuvveti-zaman grafikleri görülmektedir. Deney için pik kuvvet 12.05'inci saniyede 9.24 kN olurken sayısal analiz için bu kuvvet 2.59'uncu saniyede 13.11 kN olmuştur. İlk pik kuvvet oluşumundan sonra yırtılma oluşumunun başlaması ve ilerlemesi ile kuvvet yatay bir seyir izlemiştir.

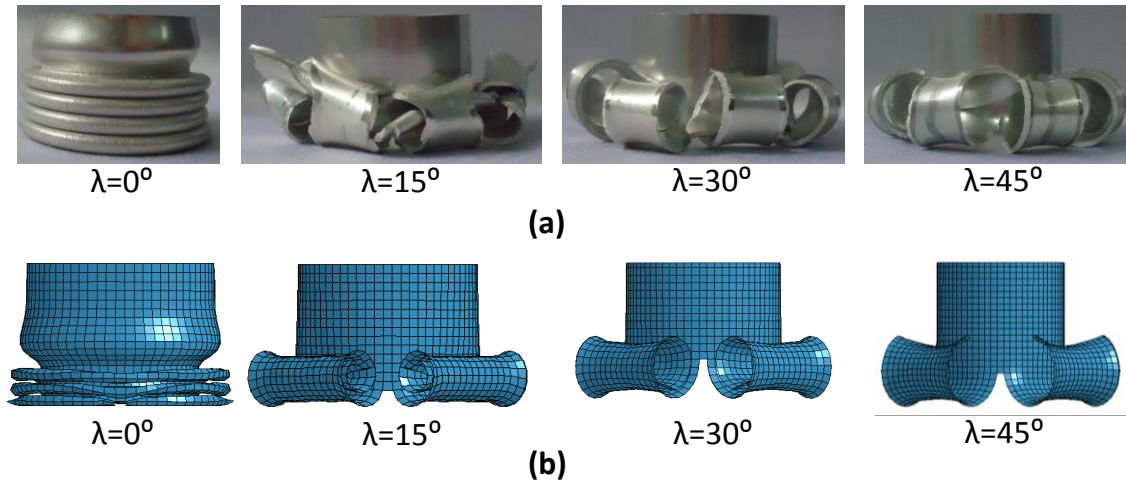


Şekil 3.3. Alt kalıp açısı 30° olan Al6063 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği

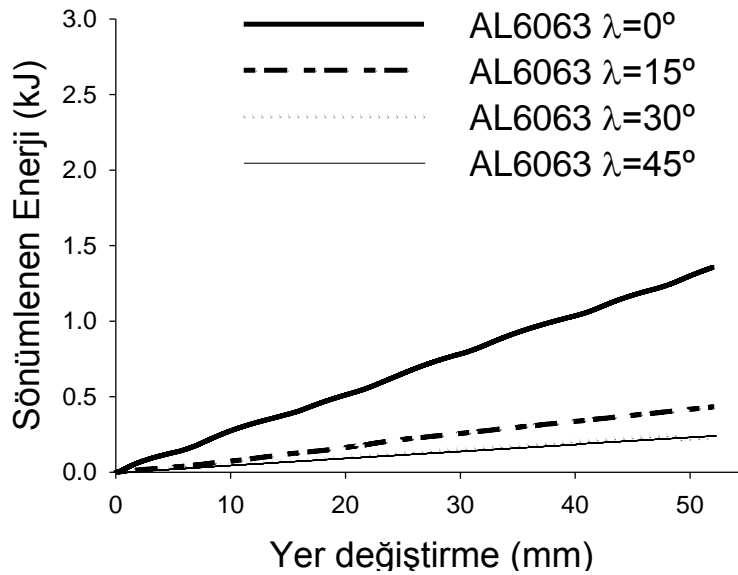


Şekil 3.4. Alt kalıp açısı 45° olan Al6063 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği

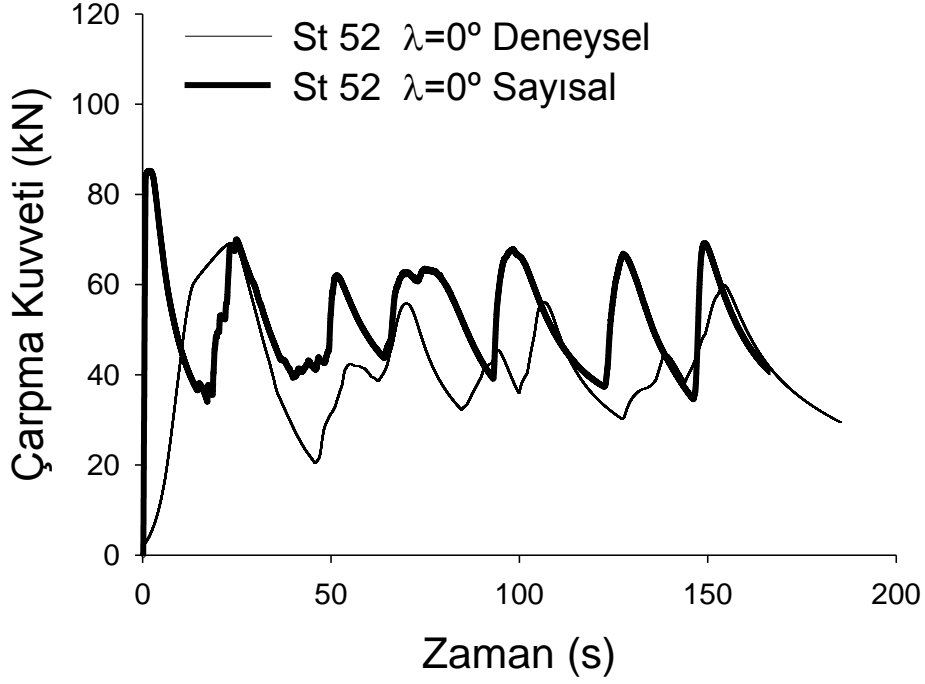
Şekil 3.5'de deneysel ve sayısal analiz için tüplerin deformasyon durumları görülmektedir. Şekil 3.6'da ise Al6063 tüplerin farklı alt kalıp açıları için yer değiştirmeye bağlı sönümlenen enerji grafikleri verilmektedir. Statik deneylerde bütün deneyler için deformasyon miktarı 52 mm olduğundan ve deneylerin gerçekleşmesi uzun zaman aldığı için sönümlenen enerji grafiklerinin yatay ekseninde deformasyon miktarı değişimi verilmiştir. Sönümlenen enerjiler 52 mm'lik toplam deformasyon sonunda $\lambda=0^\circ$ için 1.35 kJ, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$ ve $\lambda=45^\circ$ için sırasıyla 0.43 kJ, 0.23 kJ, 0.24 kJ olmuştur.



Şekil 3.5. Statik durumda Al6063 tüplerin $\lambda=0^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$ ve $\lambda=45^\circ$ alt kalıp açıları için deneysel (a) ve sayısal (b) deformasyon şekilleri



Şekil 3.6. Statik yükleme için Al6063 tüplerin farklı alt kalıp açılarına göre sönümlenen enerji-yer değiştirme grafikleri



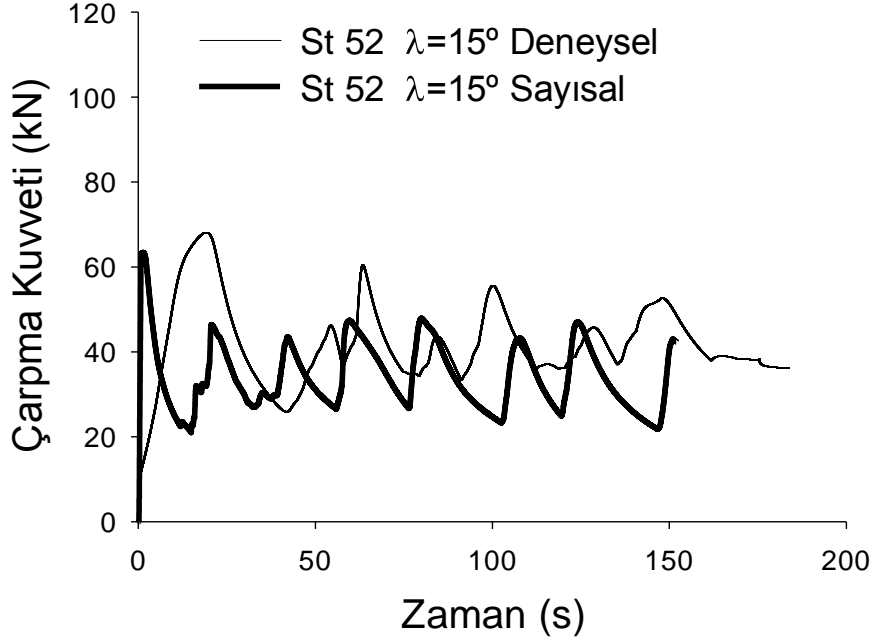
Şekil 3.7. Alt kalıp açısı 0° olan St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği

Şekil 3.7'de statik durum için St52 malzemeden yapılmış, alt kalıp açısı 0° olan tüplerin deney ve sayısal analiz sonuçları verilmektedir. Pik kuvvetler deney sonuçları için 22.75'inci saniyede 69.38 kN olarak gerçekleşirken sayısal analizler için 4.97'nci saniyede ve 85.22 kN olarak gerçekleşmiştir. İlk halka oluşumundan sonra kuvvet ikinci halka oluşumuna kadar azalmış ve ikinci halka oluşumunda tekrar artmıştır. Bu davranış bütün halka oluşumları için benzer şekilde gerçekleşmektedir.

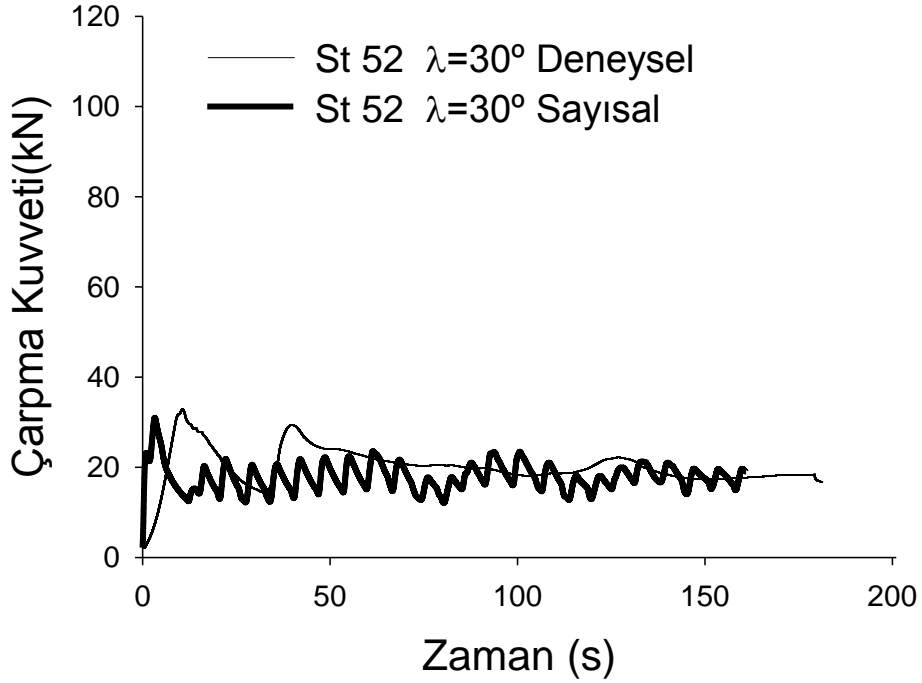
Şekil 3.8'de deney ve sayısal analiz için statik şartlar altında St52 malzemeden yapılmış ve alt kalıp açısı 15° olan tüpler için çarpma kuvveti-zaman grafiği verilmektedir. Deney için pik kuvvet 18.70'inci saniyede 68.37 kN olurken sayısal analiz için 1.20'nci saniyede 63.41 kN olmuştur. Deneysel ve sayısal analiz sonuçları örtüşmüş ve ikisinde de kıvrım oluşmamıştır. Tüp ile kalıp arasındaki sürtünme kuvveti nedeniyle kalıp tüpün kıvrım oluşturmamasına engel olmuş ve halka oluşarak enerji sönümlenmesi gerçekleşmiştir.

Şekil 3.9'da ise statik durum için St52 malzemeden yapılmış, alt kalıp açısı 30° olan tüplerin deney ve sayısal analiz sonuçları verilmektedir. Şekilde deney için pik kuvvet 10.25'inci saniyede 33.22 kN olarak gerçekleşirken sayısal analiz için 8.83'üncü saniyede 30.98 kN olmuştur. Kalıp açısının büyümesi ile pik kuvvet azalmıştır. Deney ve sayısal

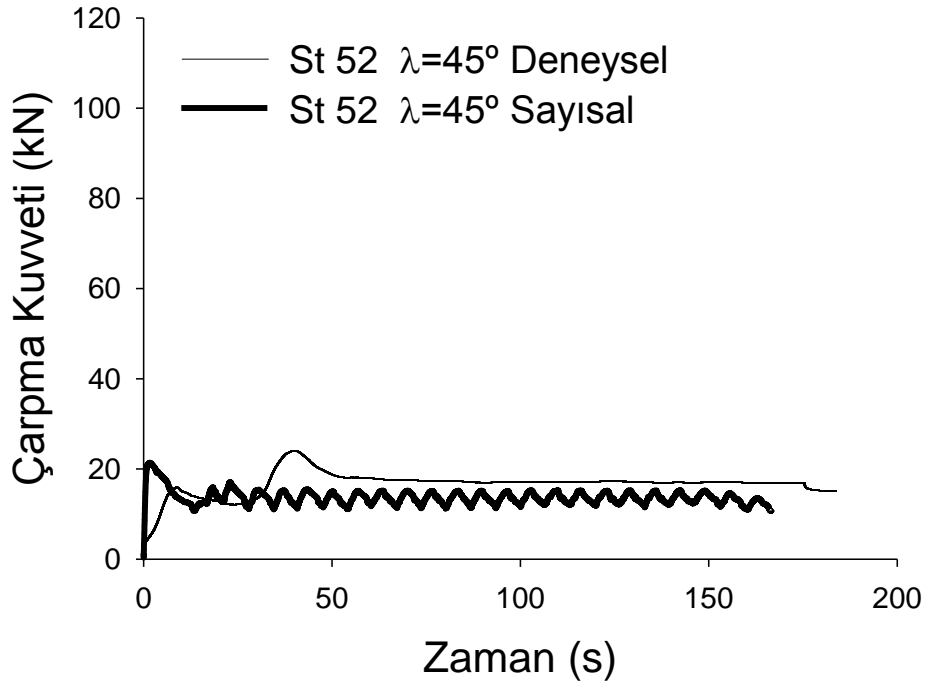
analizde oluşan ikinci pik kuvveti, kıvrım (yarılan kenar parçası) oluşurken tüpün kenarlarının döñüp tekrar tüpe temas etmesi sonucunda meydana gelmektedir.



Şekil 3.8. Alt kalıp açısı 15° olan St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği



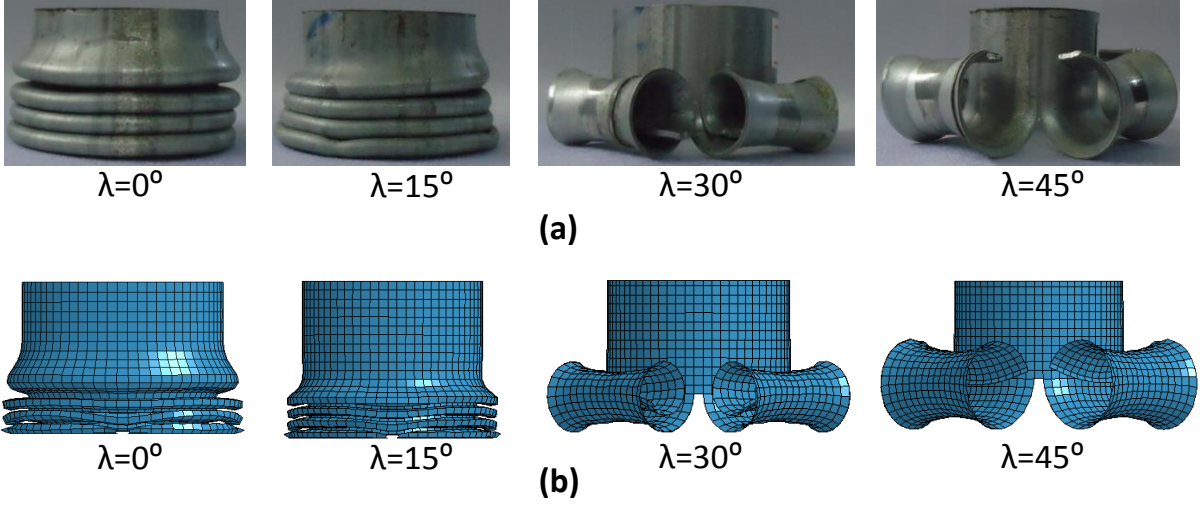
Şekil 3.9. Alt kalıp açısı 30° olan St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği



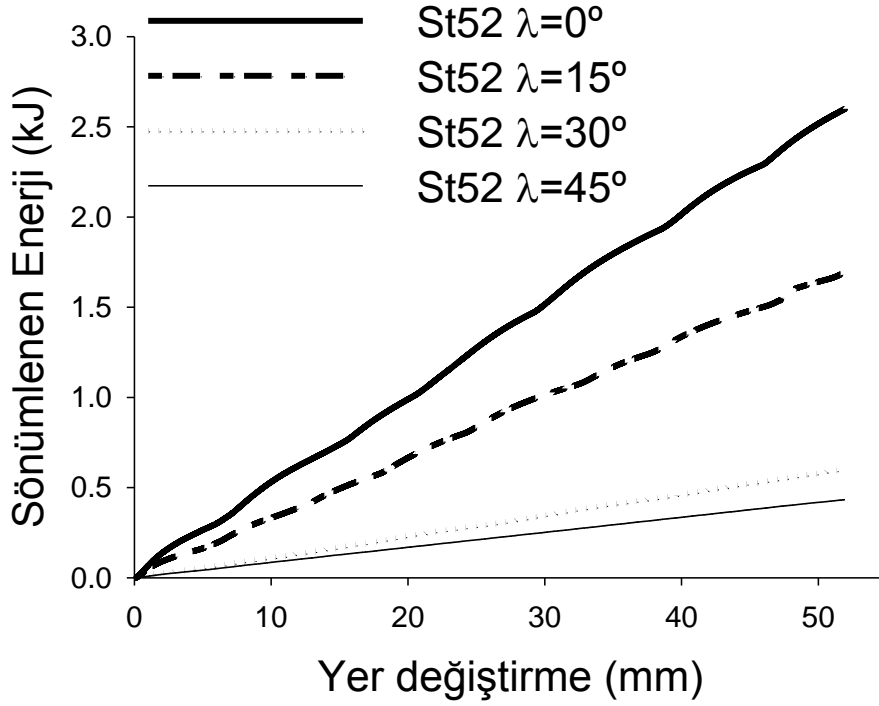
Şekil 3.10. Alt kalıp açısı 45° olan St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği

Şekil 3.10'da statik durum için St52 malzemeden yapılmış, alt kalıp açısı 45° olan tüplerin deney ve sayısal analiz sonuçları görülmektedir. Şekilden deney için pik kuvvet 39.80'inci saniyede 24.28 kN olurken sayısal analiz için 1.85'inci saniyede 21.31 kN olarak gerçekleşmiştir. Oluşan pik kuvvetlerden sonra yırtılmanın ilerlemesi ve deformasyonu kolaylaştırması kuvvetin yatay bir seyir izlemesine neden olmuştur.

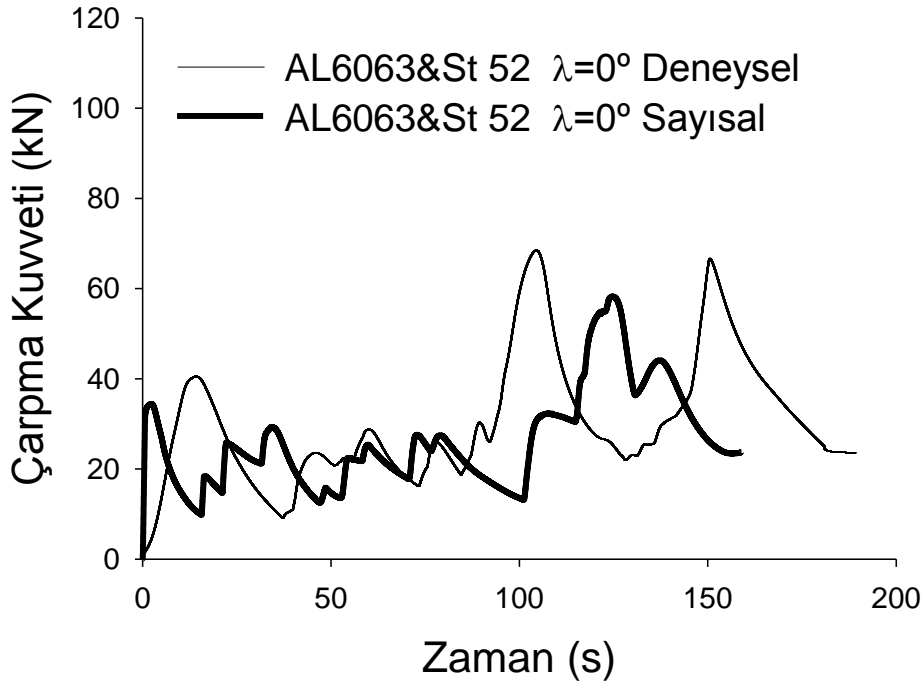
Şekil 3.11'de St52 tüplerin $\lambda=0^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$ ve $\lambda=45^\circ$ koniklik açıları için deneysel ve sayısal durum sonucunda oluşan deformasyon durumları görülmekteyken Şekil 3.12'de farklı kalıp açıları için yer değiştirmeye bağlı sönümlenen enerji grafikleri görülmektedir. Deformasyon 52 mm'ye ulaştığında sönümlenen enerji miktarları $\lambda=0^\circ$ için 2.59 kJ, $\lambda=15^\circ$ için 1.69 kJ, $\lambda=30^\circ$ için 0.60 kJ ve $\lambda=45^\circ$ için 0.43 kJ olmuştur. Koniklik açısının artması ile kuvvet değerlerinin düşmesi ve çarpma kuvveti-zaman grafiği altındaki alanın azalmasıyla sönümlenen enerji miktarlarının azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 3.11. Statik durumda St52 tüplerin $\lambda=0^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$ ve $\lambda=45^\circ$ kalıp açıları için deneysel (a) ve sayısal (b) deformasyon şekilleri



Şekil 3.12. Statik şartlar altında St52 tüplerin farklı alt kalıp açılarına göre sönümlenen enerji yer değiştirme grafikleri

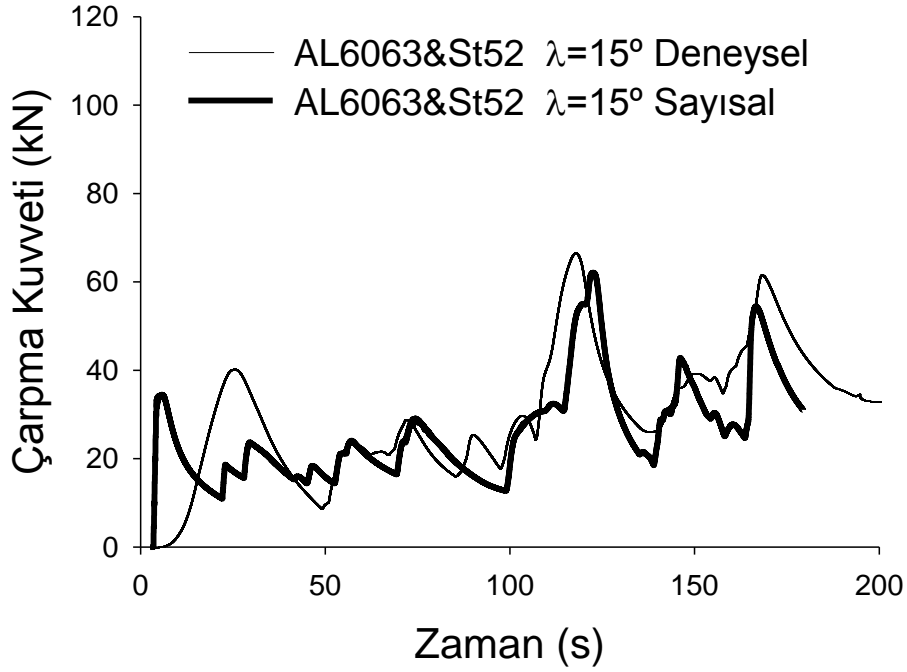


Şekil 3.13. Alt kalıp açısı 0° olan Al6063&St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği

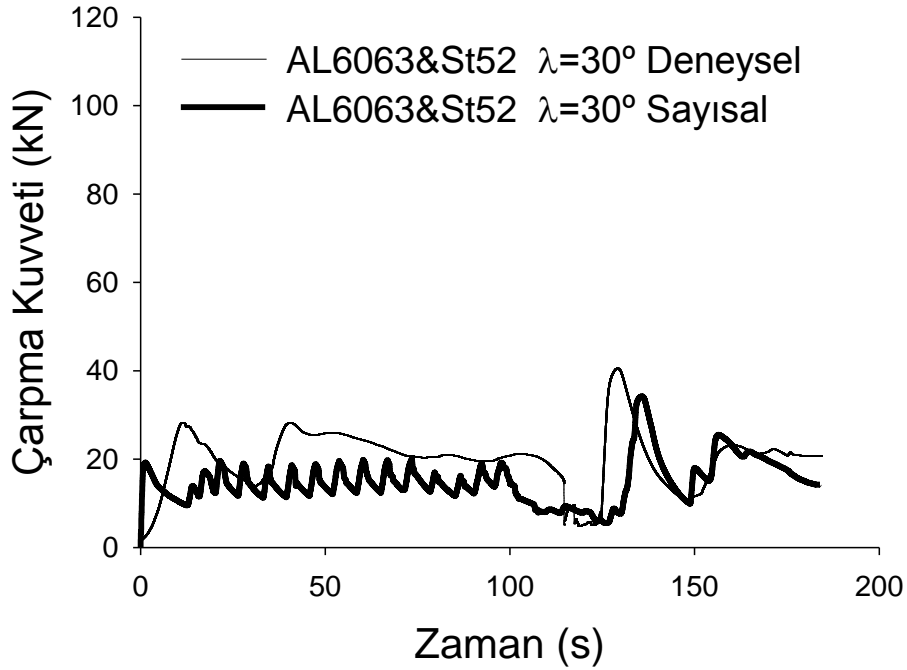
Şekil 3.13'de statik şartlar altında Al6063&St52 tüplerin, alt kalıp açısı 0° için deney ve sayısal analiz sonuçları görülmektedir. Al6063 ve St52 den oluşan tüpte Al6063'ün dayanımı St52'ye göre daha düşük olduğundan deformasyon ilk olarak Al6063'den yapılmış kısımda başlamış ve sonrasında St52'den yapılan tüp deforme olmuştur. Tüpün Al6063 malzemeden yapılmış kısmı için pik kuvvet, deneyde 14.20'nci saniyede 40.70 kN olarak oluşurken sayısal analizde 1.54'inci saniyede ve 33.97 kN olarak gerçekleşmiştir. Al6063'ün deformasyonu sonrasında St52'den yapılmış tüp deformasyona başlamıştır. Deneyde 104.25'inci saniyede 68.69 kN ile pik kuvvet oluşurken sayısal analiz için 124.75'inci saniyede 58.24 kN olmuştur.

Şekil 3.14'de ise alt kalıp açısı 15° olan Al6063&St52 tüplerin sayısal ve deneysel çarpma kuvveti-zaman grafikleri verilmektedir. Tüpün Al6063 kısmının deformasyonu sürecinde deneyde pik kuvvet 25.20'nci saniyede 40.48 kN olurken sayısal analiz için pik kuvvet 5.50'nci saniyede ve 34.42 kN olmuştur. St52 ve $\lambda=15^\circ$ için gerçekleşen durumda olduğu gibi burada da kalıp ile tüpün arasındaki sürtünmeden dolayı kıvrım oluşmamış ve deformasyon halka oluşarak gerçekleşmiştir. Al6063'ün maksimum deformasyona ulaştığında tüpün St52 malzemeden yapılmış kısmı deformasyona başlaması için kuvvet artmıştır. Tüpün

ikinci kısmı için deneyde pik kuvvet 117.50nci saniyede 66.72 kN olurken sayısal analizde 122.60 'ıncı saniyede 62.07 kN olarak gerçekleşmiştir.

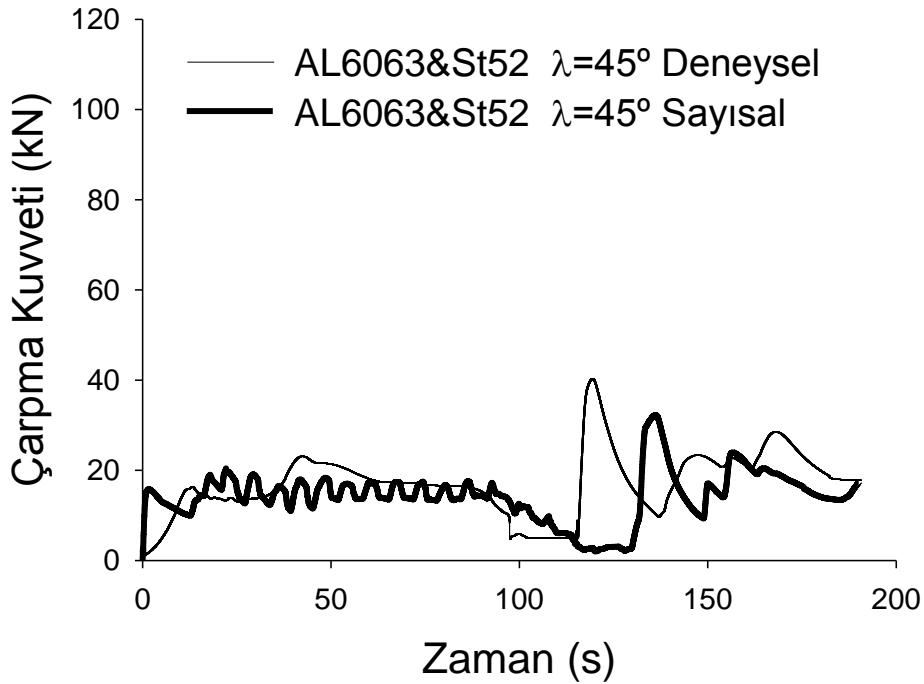


Şekil 3.14. Alt kalıp açısı 15° olan Al6063&St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği



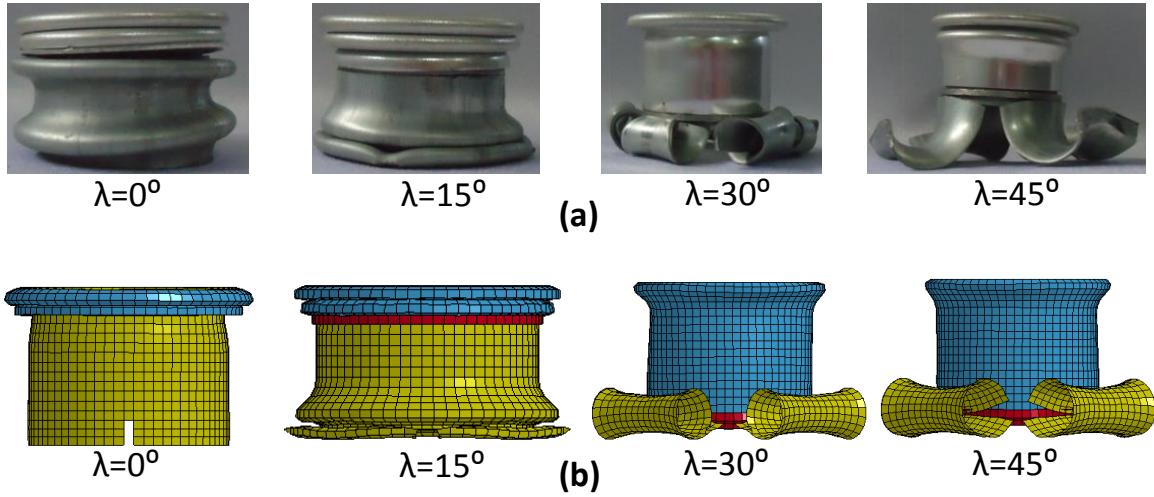
Şekil 3.15. Alt kalıp açısı 30° olan Al6063&St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği

Şekil 3.15'de, alt kalıp açısı 30° olan Al6063&St52 tüplerin sayısal ve deneysel çarpma kuvveti-zaman grafikleri görülmektedir. Tüp ilk olarak ast kısmı olan St52'den deformasyona başlamıştır. Burada deney için pik kuvvet 11.05'inci saniyede 28.50 kN olurken sayısal analizde 1.25'inci saniyede 19.25 kN olarak gerçekleşmiştir. Çatlak ilerlemesi sonrası St52'den yapılmış tüp tamamen deforme olmuş ve sonrasında aparat ile kalıp temasa geçmiştir. Bu andan itibaren Al6063'den yapılmış tüp halka şeklinde deformasyona başlamıştır. Deney sonuçlarında pik kuvvet 128.85'inci saniyede 40.81 kN olarak gerçekleşirken sayısal analiz için pik kuvvet 135.70'inci saniyede 34.20 kN olmuştur.

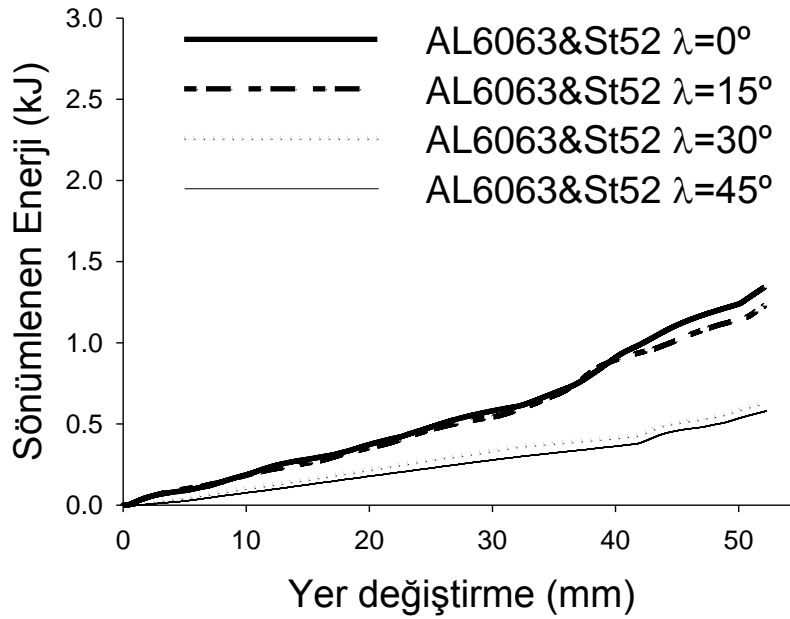


Şekil 3.16. Alt kalıp açısı 45° olan Al6063&St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği

Şekil 3.16'da, alt kalıp açısı 45° olan Al6063&St52 tüplerin sayısal ve deneysel çarpma kuvveti-zaman grafikleri verilmektedir. Bu deney ve analizde ilk önce tüpün St52 kısmı deformasyona maruz kalmış, sonrasında tüpün Al6063 kısmı halka oluşumu şeklinde deforme olmuştur. Tüpün St52'den yapılmış alt kısmı için pik kuvvet deneyde 41.90'ıncı saniyede 23.34 kN olurken sayısal analizde 29.35'inci saniyede 19.12 kN olarak gerçekleşmiştir. St52'den yapılmış tüp tamamen deformasyona maruz kaldığında kalıp ile aparat arasında temas başlamış ve bu süreçte tüpün Al6063'ten yapılmış kısmı deformasyona başlayana kadar kuvvet yatay bir seyir izlemiştir. Tüpün Al6063 kısmı için pik kuvvet deneyde 119.13'üncü saniyede ve 40.52 kN olurken sayısal analizde 136.05'inci saniyede 32.22 kN olmuştur.



Şekil 3.17. Statik durumda Al6063&St52 tüplerin $\lambda=0^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$ ve $\lambda=45^\circ$ kalıp açıları için deneysel (a) ve sayısal (b) deformasyon şekilleri



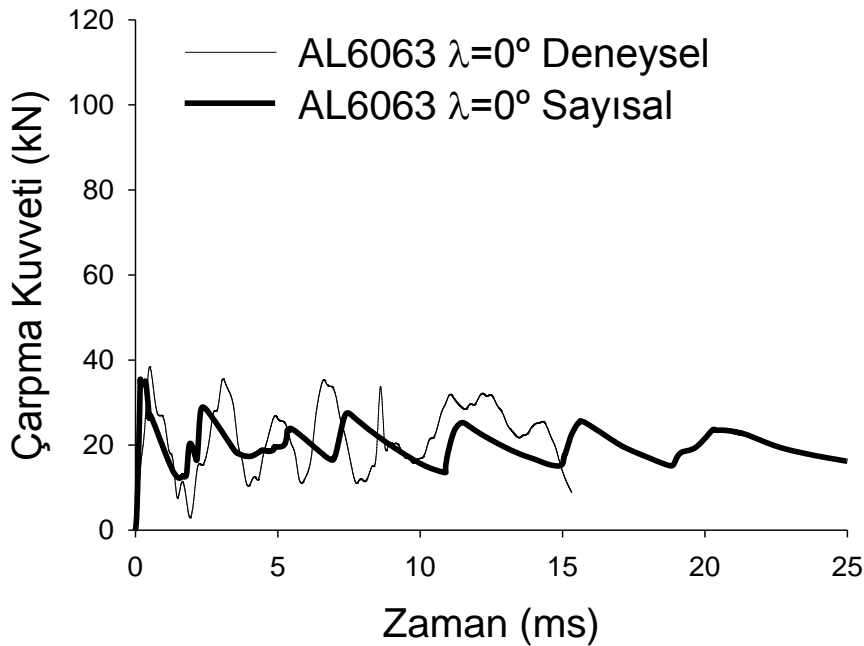
Şekil 3.18. Statik şartlar altında Al6063&St52 tüplerin farklı alt kalıp açılarına göre sönümlenen enerji-yer değiştirme grafikleri

Şekil 3.17'de Al6063&St52 tüplerin $\lambda=0^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$ ve $\lambda=45^\circ$ koniklik açıları için deneysel ve sayısal durum sonucunda oluşan deformasyon durumları görülmektedir. Şekil 3.18'de farklı kalıp açıları için yer değiştirmeye bağlı sönümlenen enerji grafikleri görülmektedir. Deformasyon 52 mm'ye ulaştığında sönümlenen enerji miktarları $\lambda=0^\circ$ için 1.37 kJ, $\lambda=15^\circ$ için 1.25 kJ, $\lambda=30^\circ$ için 0.64 kJ ve $\lambda=45^\circ$ için 0.59 kJ olmuştur.

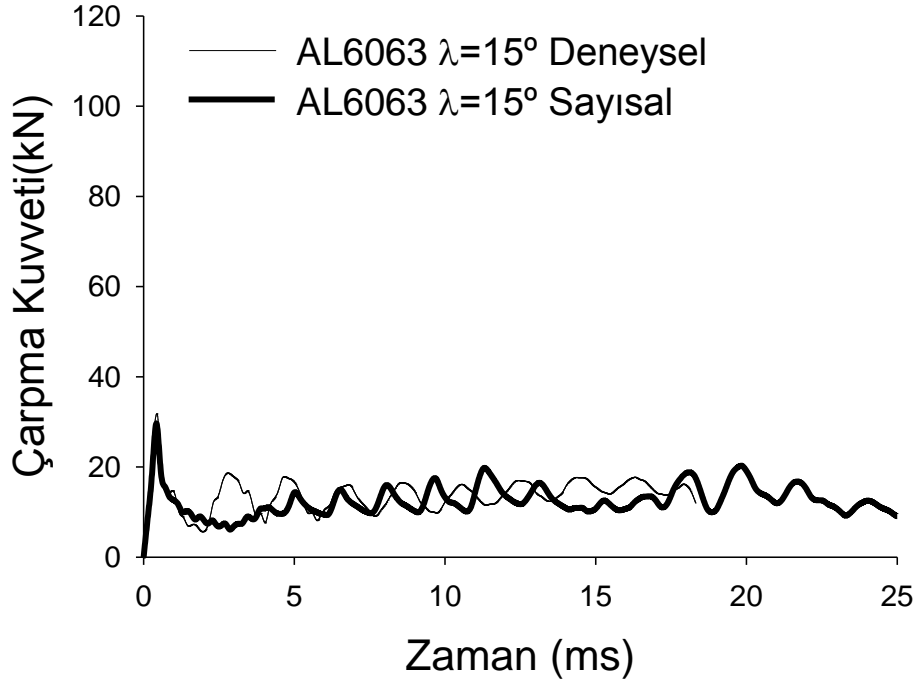
3.2. Düz Tüplerin Dinamik Kuvvet Zaman Grafikleri

Şekil 3.19'da alt kalıp açısı 0° olan Al6063 tüplerin sayısal ve deneysel çarpma kuvveti-zaman grafikleri verilmektedir. Deney için pik kuvvet 0.42 ms'de 37.83 kN olurken sayısal analiz için 0.37 ms'de 34.47 kN olmuştur. Burada deformasyon halka oluşarak gerçekleşirken ilk halka oluşuktan sonra kuvvet düşmüştür. Sonraki halka oluşmaya başladığı anda kuvvet tekrar yükselmeye başlamıştır. Bu davranış bütün halka oluşumları için benzer şekilde gerçekleşmektedir.

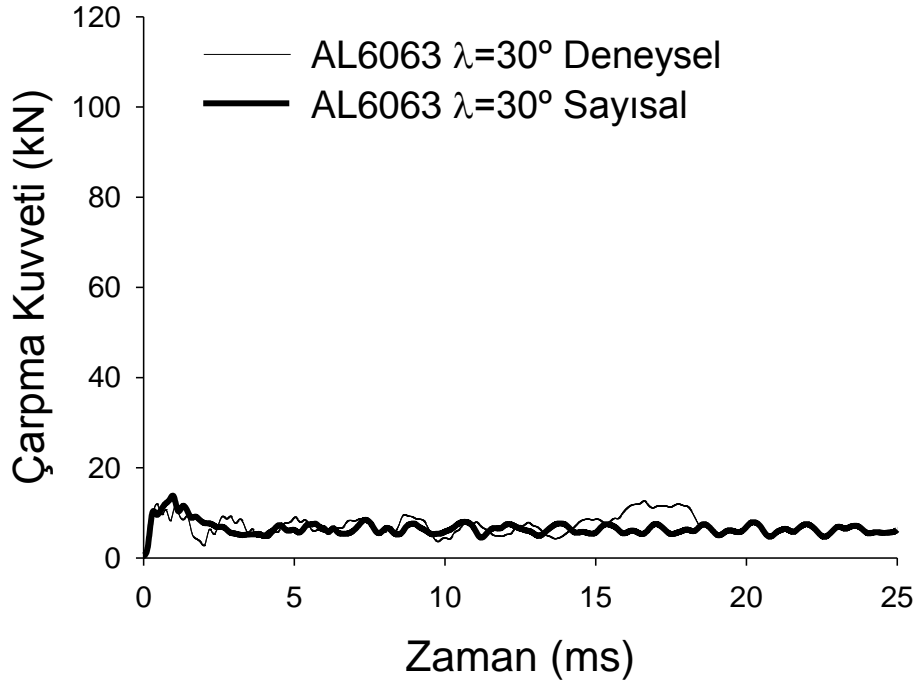
Şekil 3.20'de alt kalıp açısı 15° olan Al6063 tüplerin dinamik durum için deney ve sayısal analiz sonuçları görülmektedir. Şekilden deney sonuçları için pik kuvvetin 0.42 ms'de 31.63 kN olurken sayısal analiz için 0.42 ms'de ve 29.70 kN olarak gerçekleşmiştir. Kuvvet değeri ilk kıvrım oluşma anına kadar artmış, ardından çatlak oluşumu ve ilerlemesi ile azalma ve yatay bir seyir izlemiştir.



Şekil 3.19. Alt kalıp açısı 0° olan Al6063 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği



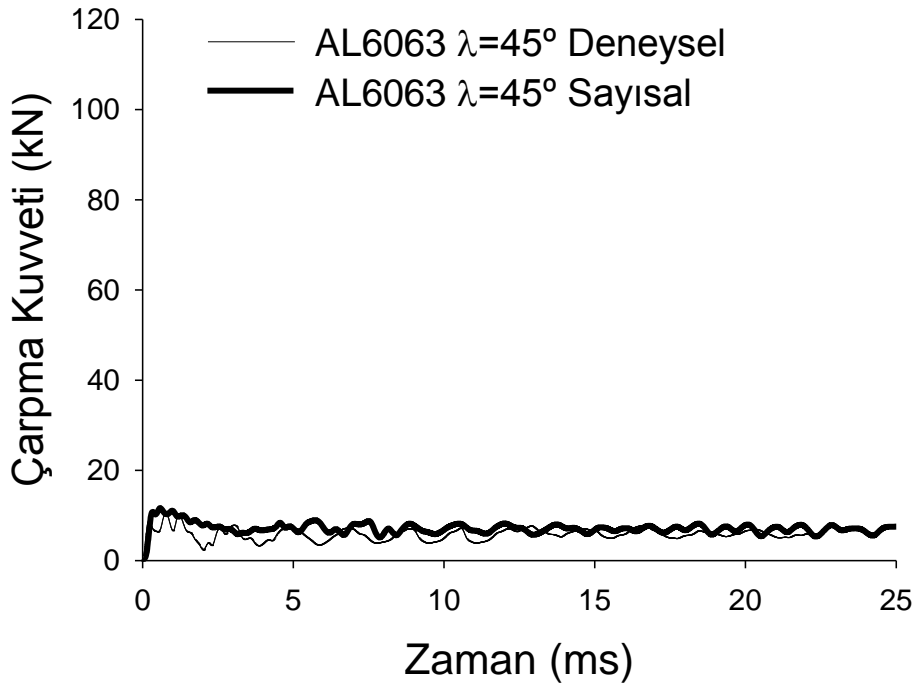
Şekil 3.20. Alt kalıp açısı 15° olan Al6063 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği



Şekil 3.21. Alt kalıp açısı 30° olan Al6063 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği

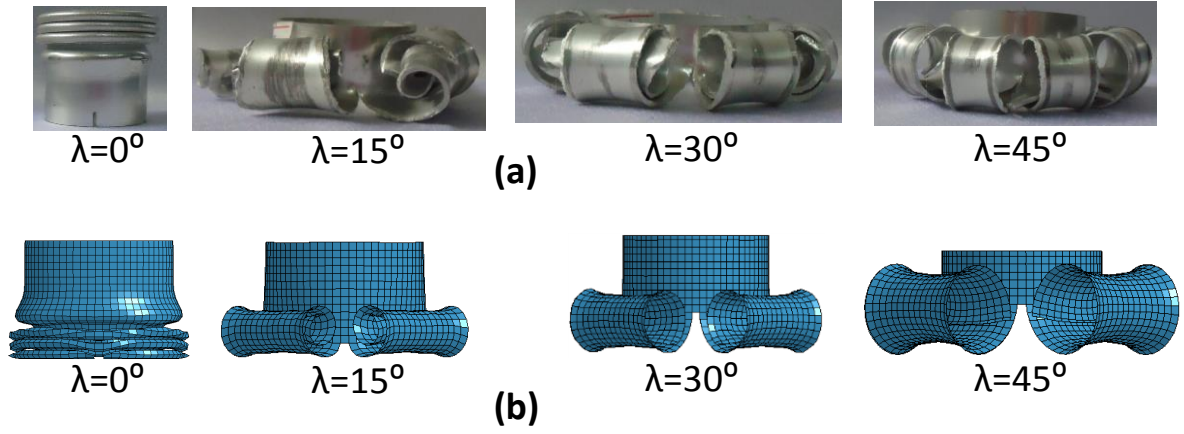
Şekil 3.21'de ise alt kalıp açısı 30° olan Al6063 tüplerin sayısal ve deneysel çarpma kuvveti-zaman grafikleri verilmektedir. Grafikten anlaşılacağı üzere deney için pik kuvvet 0.42 ncims'de 12.10 kN olarak gerçekleşirken sayısal analiz için pik kuvvet 0.98 inci ms'de ve 13.66 kN olarak gerçekleşmiştir. Kuvvet kıvrım oluşum başlangıcına kadar artmış sonrasında azalmış ve devamında yatay bir seyir izlemiştir. Kalıp açısının artması ile kıvrım oluşumu için gerekli kuvvet azalmış ve tüpün yırtılması kolaylaşmıştır.

Şekil 3.22'de dinamik durum için alt kalıp açısı 45° olan Al6063 tüplerin çarpma kuvveti-zaman grafiği görülmektedir. Deney için pik kuvvet değeri 0.71 inci ms'de 10.92 kN olurken sayısal analiz için 1.00 inci saniyede ve 11.05 kN olmuştur. İlk çatlak oluşumundan sonra malzeme yırtılma ile enerji sönümlenmiş ve kuvvet değeri yatay bir seyir izlemiştir.

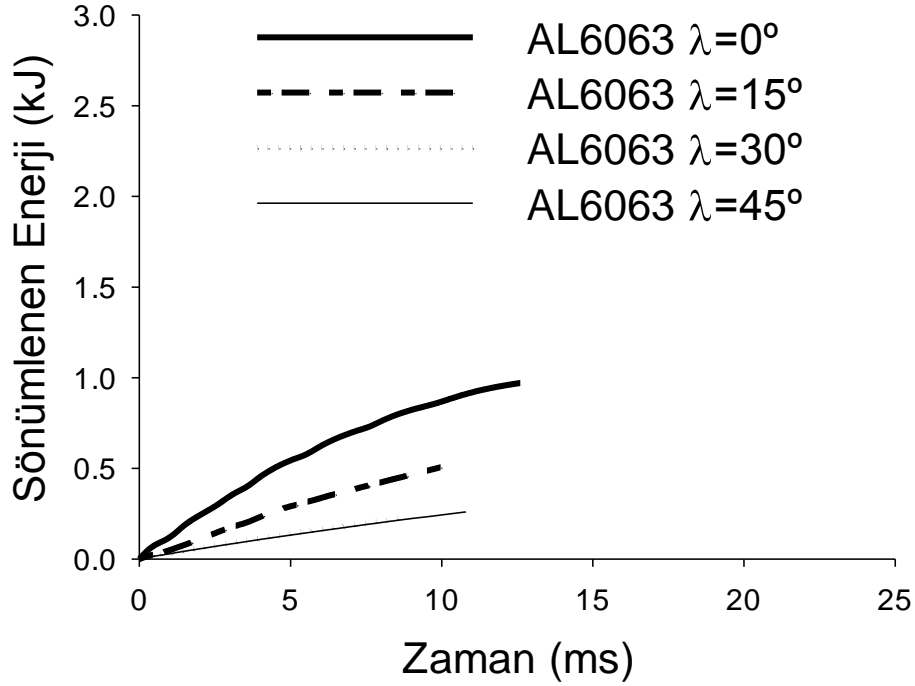


Şekil 3.22. Alt kalıp açısı 45° olan Al6063 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği

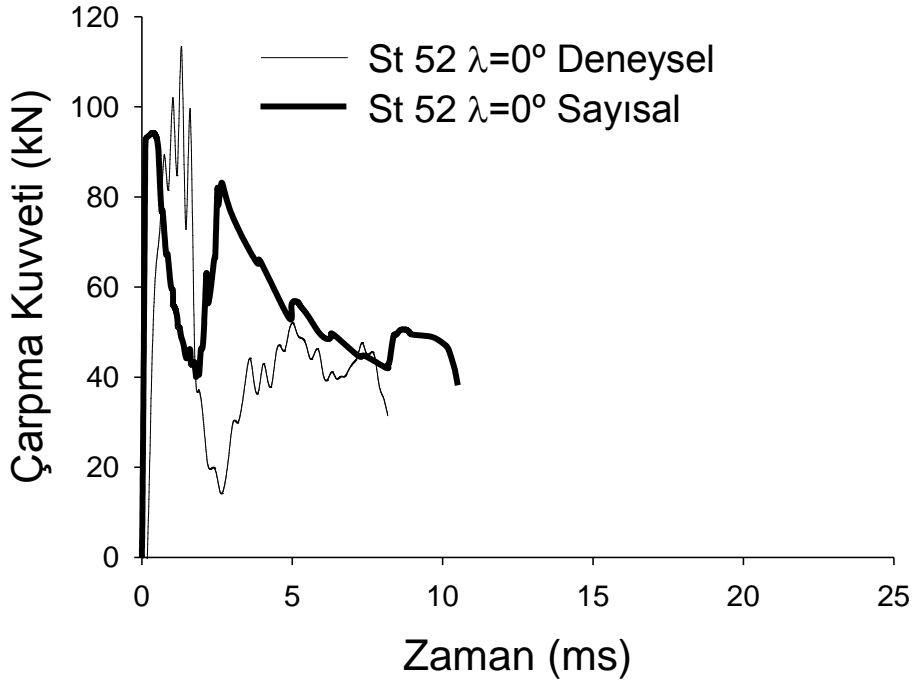
Şekil 3.23'de Al6063 tüplerin $\lambda=0^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$ ve $\lambda=45^\circ$ koniklik açıları için deneysel ve sayısal durum sonucunda oluşan deformasyon şekilleri görülmektedir. Şekil 3.24'de ise farklı kalıp açıları için yer değiştirmeye bağlı sönümlenen enerji grafikleri görülmektedir. Çarpma sonucunda sönümlenen enerji miktarları $\lambda=0^\circ$ için 0.97 kJ, $\lambda=15^\circ$ için 0.51 kJ, $\lambda=30^\circ$ için 0.22 kJ ve $\lambda=45^\circ$ için 0.26 kJ olmuştur.



Şekil 3.23. Dinamik durumda Al6063 tüplerin $\lambda=0^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$ ve $\lambda=45^\circ$ kalıp açıları için deneysel (a) ve sayısal (b) deformasyon şekilleri



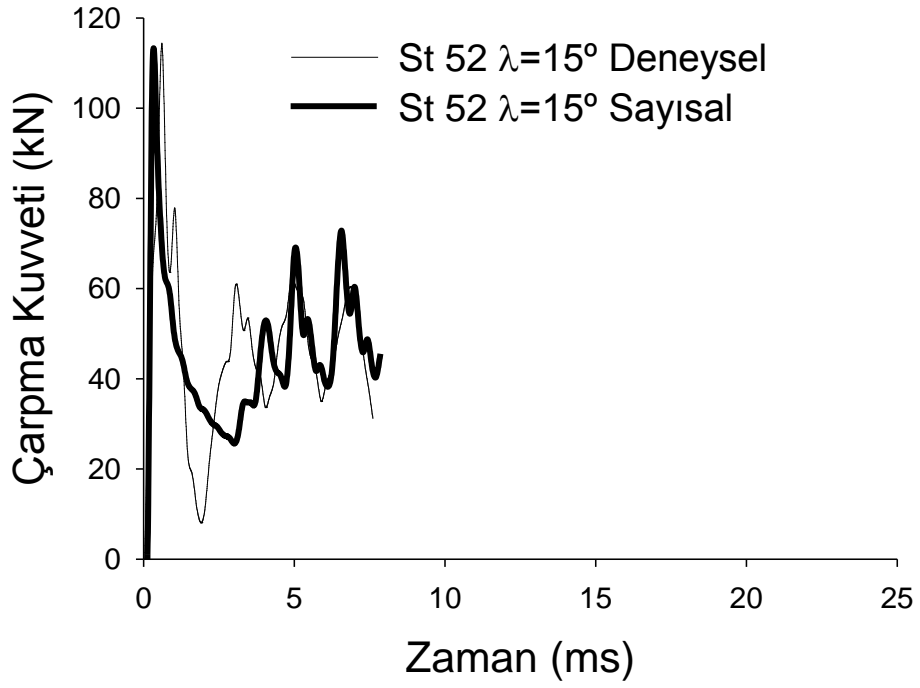
Şekil 3.24. Dinamik şartlar altında Al6063 tüplerin farklı alt kalıp açılarına göre sönümlenen enerji-yer değiştirme grafikleri



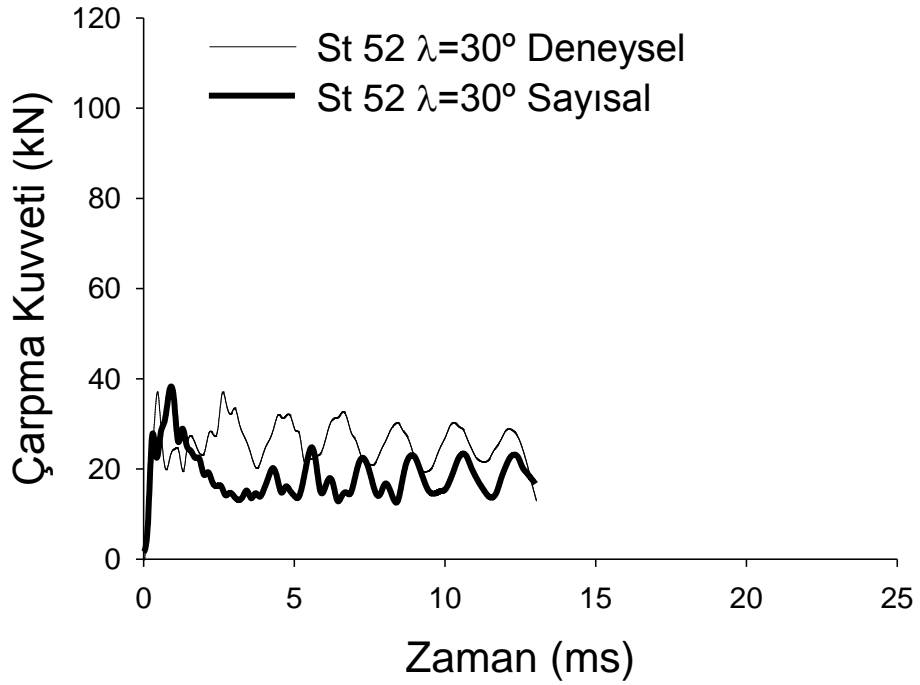
Şekil 3.25. Alt kalıp açısı 0° olan St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği

Şekil 3.25'de dinamik şartlar altında, alt kalıp açısı 0° olan St52 tüplerin deney ve sayısal analiz için çarpma kuvveti-zaman grafiği verilmektedir. Pik kuvvetler; deneysel sonuçta 1.28 inci ms'de 113.57 kN olurken sayısal analizde 0.99 uncu ms'de 94.38 kN olmuştur. Bu deneyde alt kalıp olmadığı için deformasyon halka şeklinde gerçekleşmiştir. İlk deformasyon başlangıcına kadar kuvvet artmış sonrasında ikinci halka oluşuma kadar azalırken ikinci halka oluşumun başlangıcı ile tekrar artma eğilimi göstermiştir.

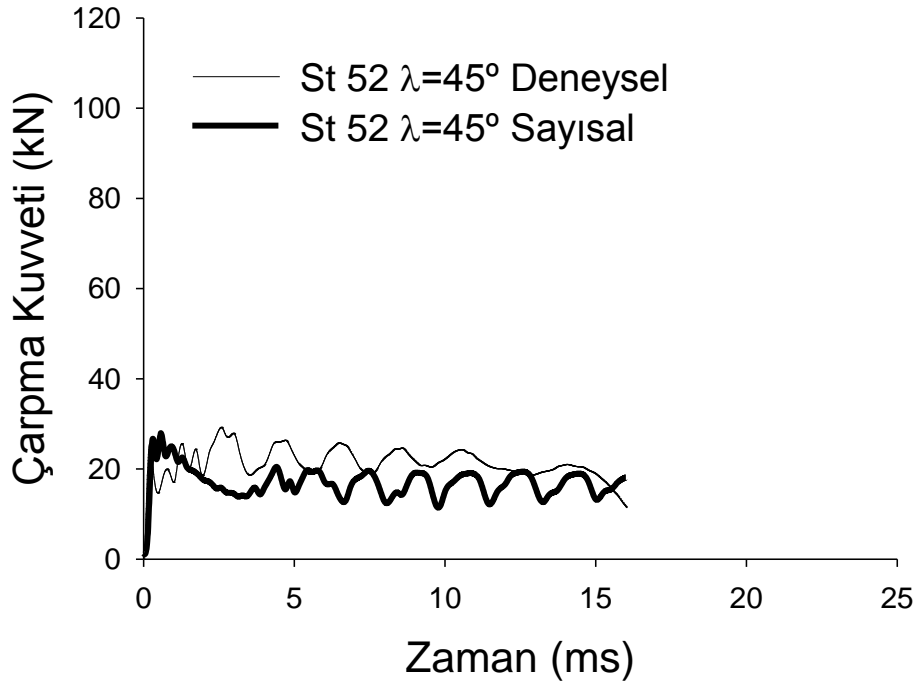
Şekil 3.26'da kalıp açısı 15° olan St52 tüplerin deney ve sayısal analiz için çarpma kuvveti-zaman grafiği görülmektedir. Grafikten deney ve sayısal analiz için pik kuvvetlerin sırasıyla 0.57 ms'de 114.63 kN ve 0.28 ms'de 105.19 kN olduğu görülmektedir. Şekil 3.27'de ise kalıp açısı 30° olan tüplerin dinamik şartlar altında deney ve sayısal analiz için çarpma kuvveti-zaman grafiği verilmektedir. Deney için 0.47'nci ms'de 37.32 kN ile pik kuvvet oluşurken sayısal analiz için 0.85 inci ms'de 37.36 kN olmuştur.



Şekil 3.26. Alt kalıp açısı 15° olan St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği



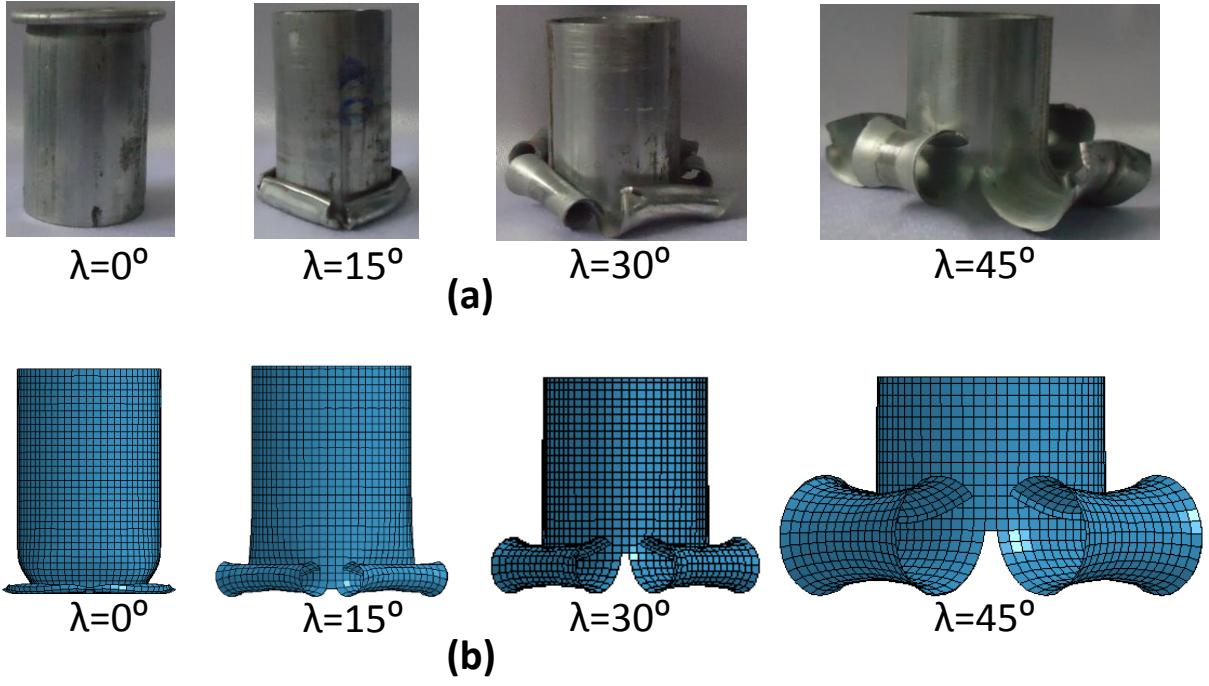
Şekil 3.27. Alt kalıp açısı 30° olan St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği



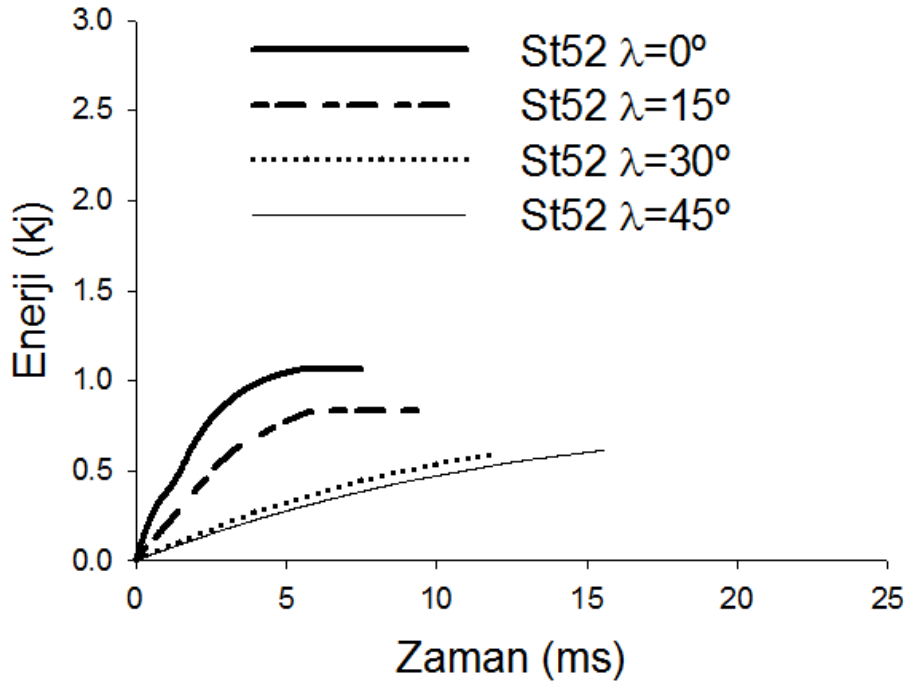
Şekil 3.28. Alt kalıp açısı 45° olan St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği

Şekil 3.28'de dinamik şartlar altında, alt kalıp açısı 45° olan St52 tüplerin deney ve sayısal analiz için çarpma kuvveti-zaman grafiği verilmektedir. Grafikten deney için pik kuvvetin 0.14 üncü ms'de 24.94 kN olduğu ve sayısal analiz için 0.28 inci ms'de 26.16 kN olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 3.29'da Al6063 tüplerin $\lambda=0^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$ ve $\lambda=45^\circ$ koniklik açıları için deneysel ve sayısal durum sonucunda oluşan deformasyon durumları; Şekil 3.30'da ise farklı kalıp açıları için yer değiştirmeye bağlı sönmülenen enerji grafikleri görülmektedir. Çarpma sonucunda sönmülenen enerji miktarları $\lambda=0^\circ$ için 1.06 kJ, $\lambda=15^\circ$ için 0.83 kJ, $\lambda=30^\circ$ için 0.59 kJ ve $\lambda=45^\circ$ için 0.61 kJ olmuştur.



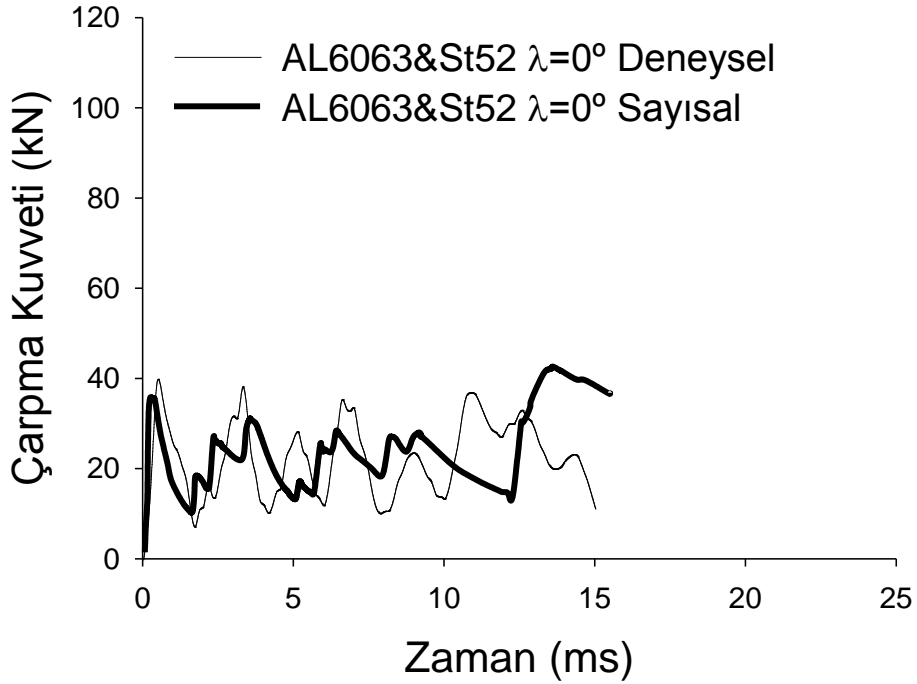
Şekil 3.29. Dinamik durumda St52 tüplerin $\lambda=0^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$ ve $\lambda=45^\circ$ kalıp açıları için deneysel (a) ve sayısal (b) deformasyon şekilleri



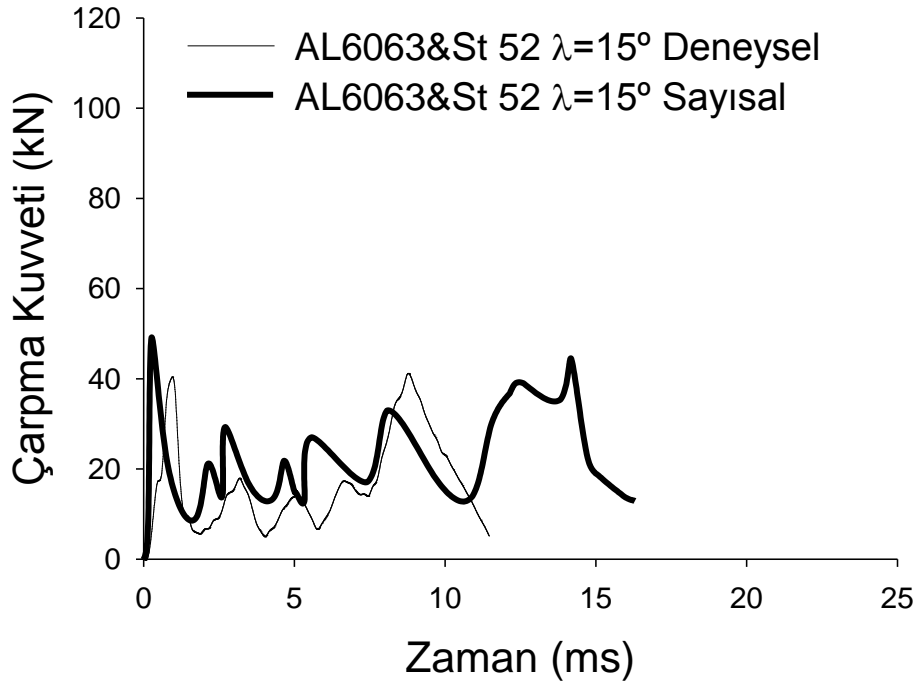
Şekil 3.30. Dinamik şartlar altında St52 tüplerin farklı alt kalıp açılarına göre sönmülenen enerji-yer değiştirme grafikleri

Şekil 3.31'de, dinamik şartlar altında, alt kalıp açısı 0° olan Al6063&St52 tüplerin deney ve sayısal analiz için çarpma kuvveti-zaman grafiği verilmektedir. Pik kuvvetler deney ve sayısal analiz için sırasıyla 0.42 ms'de 38.40 kN olurken 0.29 uncu ms'de 35.78 kN olmuştur. Deformasyon tütün Al6063 kısmında başlamış ve halka şeklinde gerçekleşmiştir. Al6063 tüp tamamen deformasyona maruz kaldıktan sonra sistemin enerjisi sönmüldüğü için St52 tüp deformasyona maruz kalmamıştır.

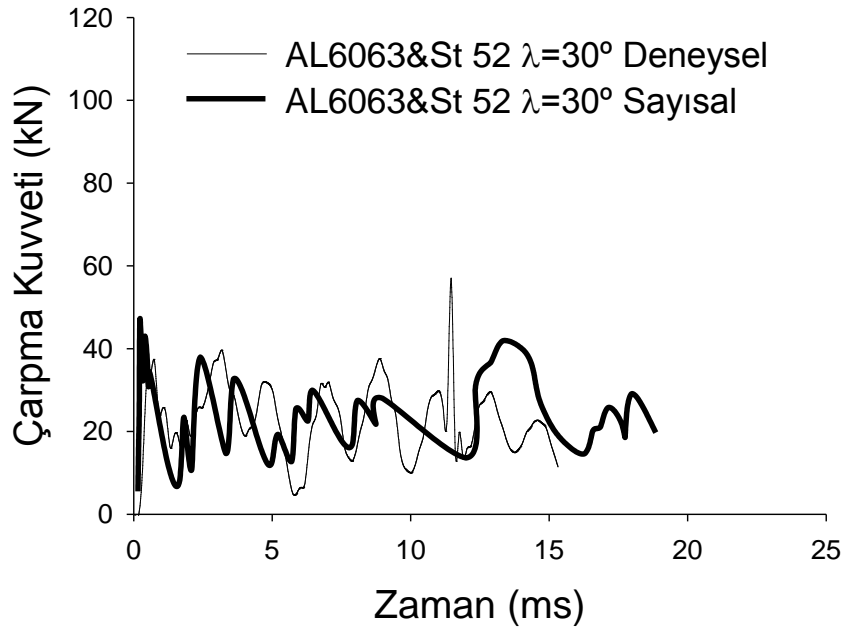
Şekil 3.32'de alt kalıp açısı 15° olan Al6063&St52 tüplerin deney ve sayısal analiz için çarpma kuvveti-zaman grafiği görülmektedir. Şekilden deney için pik kuvvet 0.85 ms'de ve 39.89 kN olurken sayısal analiz için pik kuvvetin 0.26 ms'de 49.15 kN olduğu görülmektedir. İkinci pik kuvvetler deney için 8.7ms'de 41.28 kN olurken sayısal analiz için 14.18 ms'de 44.47 kN olarak gerçekleşmiştir.



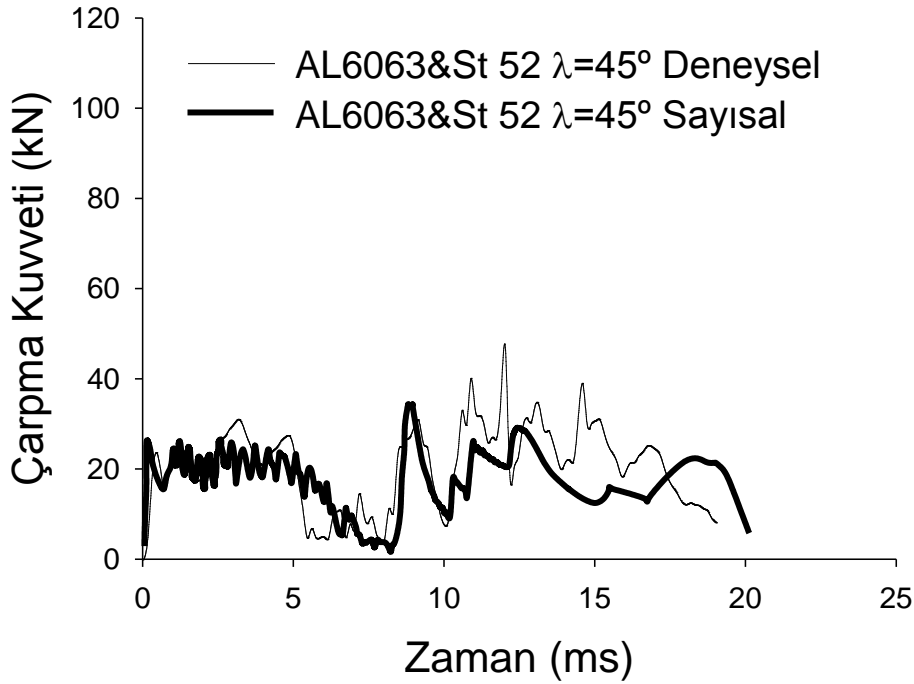
Şekil 3.31. Alt kalıp açısı 0° olan Al6063&St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği



Şekil 3.32. Alt kalıp açısı 15° olan Al6063&St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği



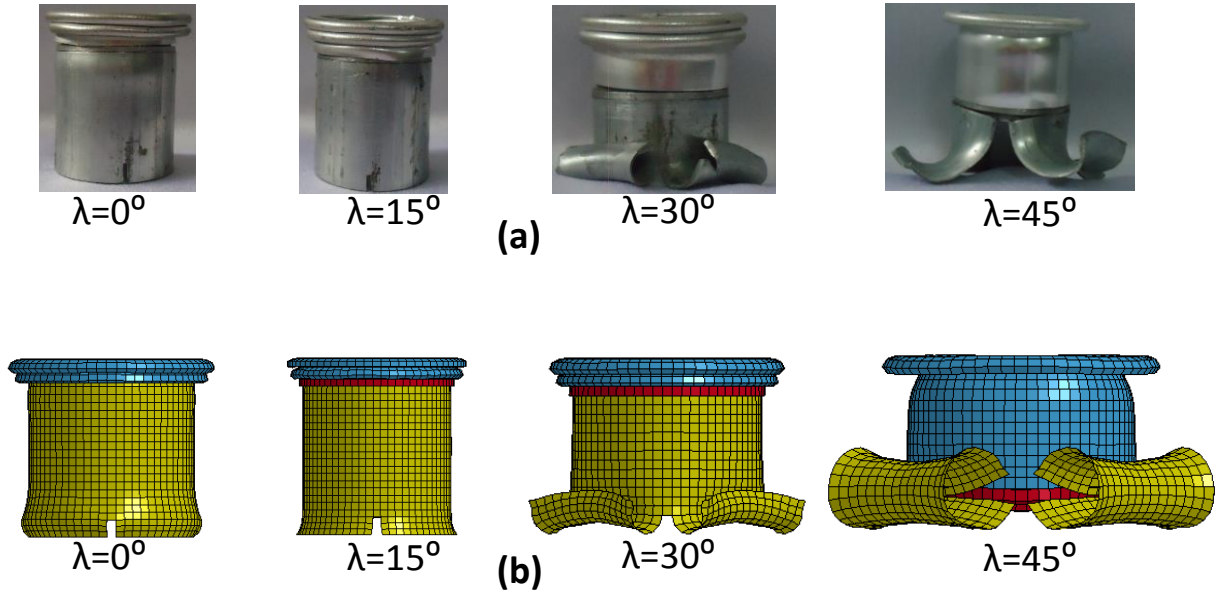
Şekil 3.33. Alt kalıp açısı 30° olan Al6063&St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği



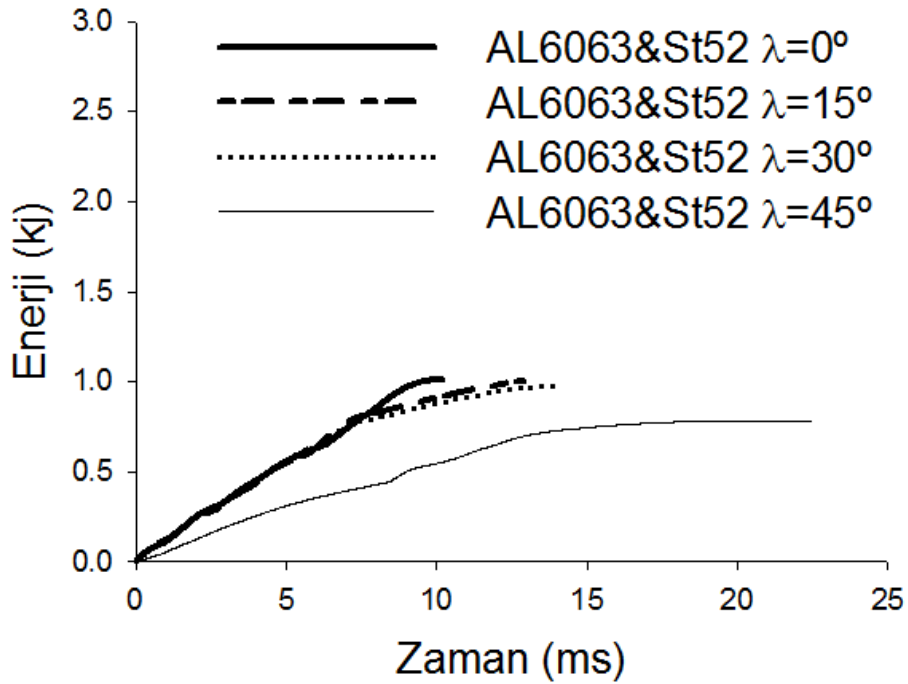
Şekil 3.34. Alt kalıp açısı 45° olan Al6063&St52 tüp için çarpma kuvveti-zaman grafiği

Şekil 3.33'de dinamik şartlar altında, alt kalıp açısı 30° olan Al6063&St52 tüplerin deney ve sayısal analiz için çarpma kuvveti-zaman grafiği verilmektedir. Şekilden pik kuvvetlerin deney ve sayısal analiz için sırasıyla 0.71 ms'de 37.39 kN ve 2.4ms'de 38.00 kN olduğu görülmektedir. Başlangıçta Al6063 tüp halka şeklinde deformasyona maruz kalmış ve sonrasında St52 tüp çatlak başlangıcı ve yarıma ile sistemin enerjisini sönmlemeye devam etmiştir. İkinci pik kuvvetler deney için 11.40 ms'de 57.24 kN olurken sayısal analiz için 13.32 ms'de 41.92 kN olmuştur.

Şekil 3.34'de ise alt kalıp açısı 45° olan Al6063&St52 tüplerin deney ve sayısal analiz için çarpma kuvveti-zaman grafiği verilmektedir. İlk deformasyon St52 malzemede meydana gelmiş ve yarıma ile enerji sönmleme stroku sona erdikten sonra Al6063 malzeme halka oluşturarak deforme olmaya başlamıştır. St52 malzeme tamamen deforme olduktan sonra kalıp ile aparat temasa geçmiş ve Al6063 malzeme deformasyona başlayana kadar kuvvet yatay bir seyir izlemiştir. St 52 malzeme için oluşan pik kuvvetler deney ve sayısal analizde sırayla 3.14 ms'de 31.22 kN, 0.14 ms'de 26.34 kN olarak gerçekleşmiştir. Al6063 malzeme için oluşan ikinci pik kuvvet deney için 9.14 ms'de 30.72 kN, sayısal analiz için 8.90 ms'de 34.18 kN şeklinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3.35. Dinamik durumda Al6063&St52 tüplerin $\lambda=0^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$ ve $\lambda=45^\circ$ kalıp açıları için deneysel (a) ve sayısal (b) deformasyon şekilleri



Şekil 3.36. Dinamik şartlar altında Al6063&St52 tüplerin farklı alt kalıp açılarına göre sönmölenen enerji-yer değiştirme grafikleri

Şekil 3.35'de Al6063 tüplerin $\lambda=0^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$ ve $\lambda=45^\circ$ koniklik açıları için deneysel ve sayısal durum sonucunda oluşan deformasyon durumları görölmektedir. Şekil 3.36'da farklı kalıp açıları için yer değiştirmeye bağlı sönmölenen enerji grafikleri

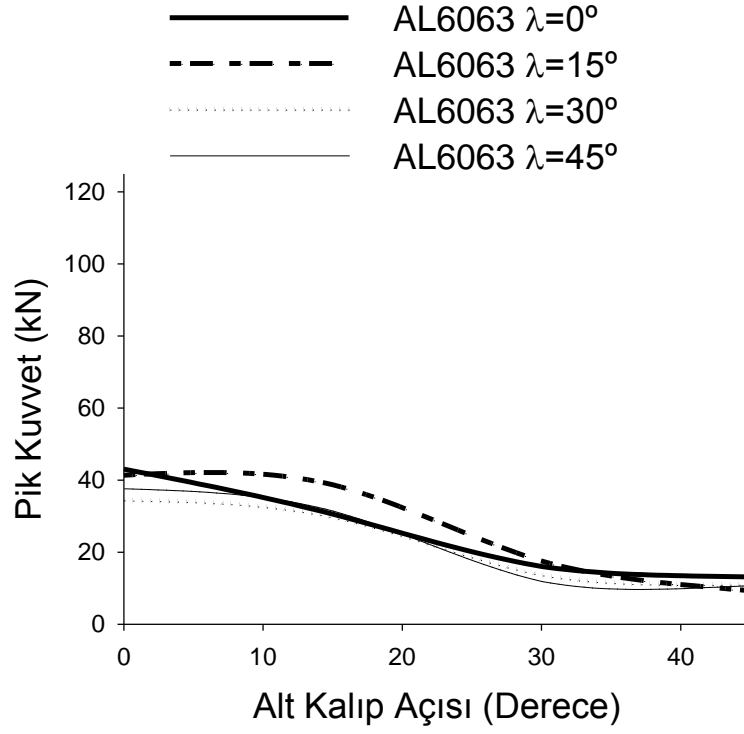
görülmektedir. Çarpma sonucunda sönmölenen enerji miktarları $\lambda=0^\circ$ için 1.01 kJ, $\lambda=15^\circ$ için 1.00 kJ, $\lambda=30^\circ$ için 0.97 kJ ve $\lambda=45^\circ$ için 0.77 kJ olmuştur.

3.3. Düz Tüplerde Alt Kalıp Açısının Pik Kuvvete Ve Ortalama Kuvvete Etkisi

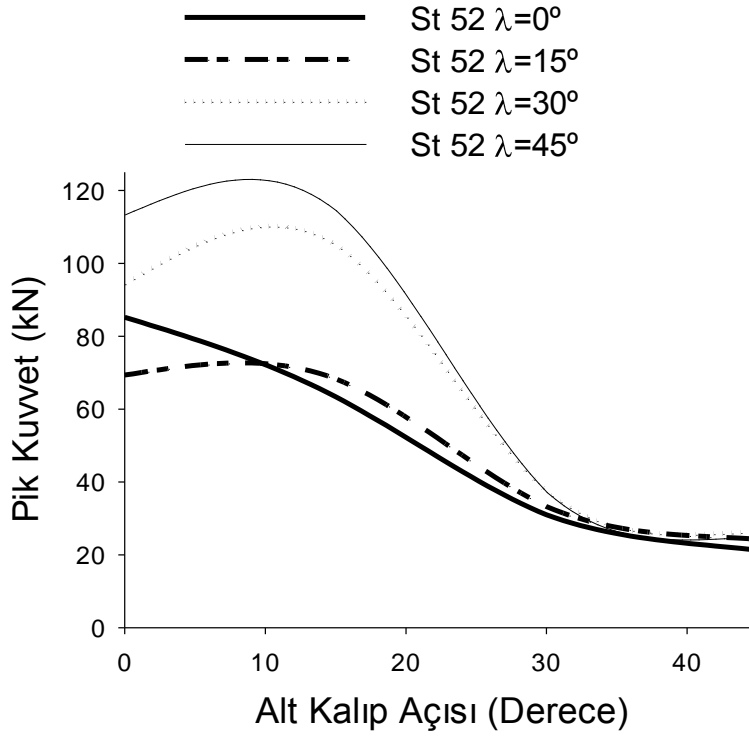
Deney ve sayısal analiz için farklı kalıp açlarına göre Al6063, St52, Al6063&St52 tüplerin statik ve dinamik durumda pik kuvvet değişimleri Şekil 3.37, Şekil 3.38, Şekil 3.39'da ve tablo olarak Ek.1'de görölmektedir. Al6063&St52 tüplerde iki farklı tüp olduğu ve bir tüpün deformasyon mesafesi bittiğinde diğer tüpün deformasyonu başladığı için iki adet pik kuvvet ortaya çıkmıştır. Al6063&St52 tüplerde dinamik durumda $\lambda=0^\circ$ kalıp açısı için sistem enerjisi tek tüpte sönmölendiği ve ikinci tüpün deformasyonu başlamadığı için ikinci pik kuvvetler oluşmamıştır.

Şekil 3.37'den Al6063 tüplerde statik durumda $\lambda=0^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$ ve $\lambda=45^\circ$ farklı kalıp açılarında pik kuvvetler sırasıyla sayısal analiz için 43.06 kN, 30. 57 kN, 16.05 kN, 13.11 kN olurken deney için 41.35 kN, 38.70 kN, 17.50 kN, 9.24 kN olmuştur. Dinamik durumda ise sayısal analiz için pik kuvvetler 34 kN. 47 kN, 29.70 kN, 13.66 kN, 11.05 kN olurken deney için 37.83 kN, 31.63 kN, 12.10 kN ve 10.92 kN olmuştur. Şekil 3.38'de St52 tüplerde statik durumlarda artan kalıp açısına göre pik kuvvetler sayısal analiz için 85.22 kN, 63.41 kN, 30.98 kN, 21.31 kN olurken deney için 69.38 kN, 68.37 kN, 33.22 kN, 24.28 kN olduğu görölmektedir. Dinamik durumda ise sayısal analiz için artan kalıp açısına göre pik kuvvetler 94.38 kN, 105.19kN, 37.36 kN, 26.16 kN olurken deney için 113.57 kN, 114.63 kN, 37.32 kN, 24.94 kN olmuştur.

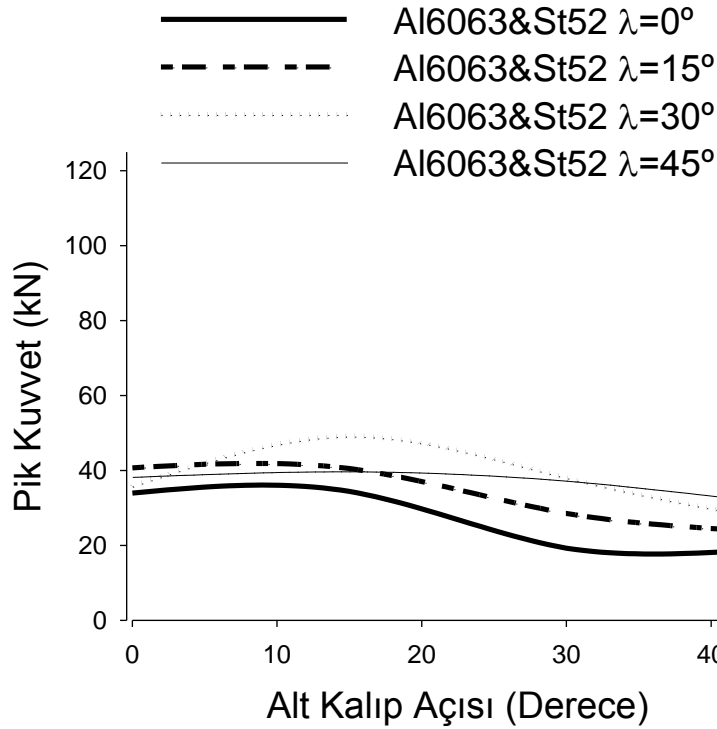
Şekil 3.39'de ise Al6063&St52 tüplerde statik durumda artan kalıp açısına göre sayısal analiz ilk pik kuvvetler 33.97kN, 34.42kN, 19.25kN, 19.12kN olurken deney için 40.70kN, 40.48kN, 28.50kN, 23.34kN olmuştur. İkinci pik kuvvetler ise 58.24kN, 62.07kN, 34.20kN, 32.22kN ve 68.69kN, 66.72kN, 40.81kN, 40.52kN olmuştur. Al6063&St52 tüplerde artan kalıp açısına göre dinamik durum için sayısal analizde ilk pik kuvvetler 35.78kN, 98.31kN, 38.00kN, 26.34kN olurken deney için 38.40kN, 79.79kN, 37.39kN, 31.22kN olmuştur.



Şekil 3.37. AL6063 tüplerin artan kalıp açılarına göre pik kuvvet değişimi



Şekil 3.38 St52 tüplerin artan kalıp açılarına göre pik kuvvet değişimleri



Şekil 3.39. Al6063&St52 tüplerin artan kalıp açılarına göre ilk pik kuvvet değişimleri

Deney ve sayısal analiz için farklı kalıp açılarına göre Al6063, St52, Al6063&St52 tüplerin statik ve dinamik durumda ortalama kuvvet değişimleri Tablo 3.1'de görülmektedir. Al6063 tüplerde artan koniklik açısına göre statik durumda ortalama kuvvet değerleri sayısal analiz için 27.33kN, 12.26kN, 7.84kN, 7.65kN olurken deney için 21.27kN, 11.49kN, 6.28kN, 4.91kN olmuştur. Dinamik durumda ise sayısal analiz için ortalama kuvvet değerleri 20.06kN, 12.25kN, 6.13kN, 6.87kN olarak gerçekleşirken deney için 22.81kN, 14.57kN, 8.19kN, 7.23kN olmuştur.

St52 tüplerde statik şartlar altında ortalama kuvvet değerleri $\lambda=0^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $\lambda=30^\circ$, $\lambda=45^\circ$ kalıp açılarında sayısal analiz için sırasıyla 51.75kN, 33.59kN, 17.89kN, 13.41kN olurken deney için ortalama kuvvet değerleri 41.56kN, 41.60kN, 19.66kN, 17.12kN olmuştur. St52 tüplerde dinamik durumda artan koniklik açısına göre sayısal analiz için ortalama kuvvet değerleri 47.31kN, 46.63kN, 20.21kN, 16.11kN; deney için ortalama kuvvet değerleri 42.64kN, 43.79kN, 25.53kN, 20.78kN elde edilmiştir.

Tablo 3.1. Kalıp açısına göre ortalama kuvvet değerleri (kN)

Malzeme	Alt Kalıp Açısı	Statik		Dinamik	
		Sayısal	Deneysel	Sayısal	Deneysel
Al6063	$\lambda = 0^\circ$	27.33	21.27	20.06	22.81
	$\lambda = 15^\circ$	12.26	11.49	12.25	14.57
	$\lambda = 30^\circ$	7.84	6.28	6.13	8.19
	$\lambda = 45^\circ$	7.65	4.91	6.87	7.23
St52	$\lambda = 0^\circ$	51.75	41.56	47.31	42.64
	$\lambda = 15^\circ$	33.59	41.60	46.63	43.79
	$\lambda = 30^\circ$	17.89	19.66	20.21	25.53
	$\lambda = 45^\circ$	13.41	17.12	16.11	20.78
Al6063 & St52	$\lambda = 0^\circ$	28.92	33.48	30.12	37.60
	$\lambda = 15^\circ$	30.22	35.75	24.14	18.73
	$\lambda = 30^\circ$	15.68	19.87	26.34	22.31
	$\lambda = 45^\circ$	14.48	18.01	18.22	21.23

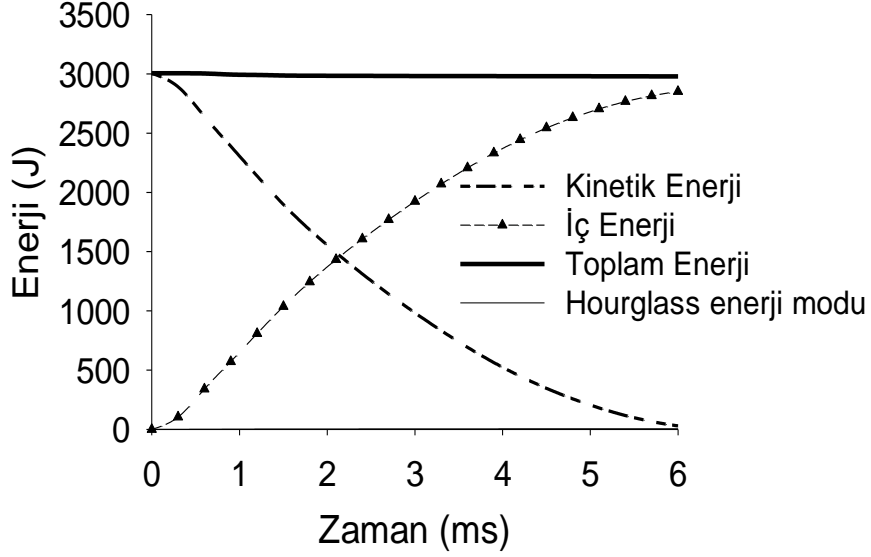
Al6063&St52 tüplerde artan koniklik açısına göre statik şartlar altında ortalama kuvvet değerleri sayısal analiz için 28.92 kN, 30.22 kN, 15.68 kN, 14.48 kN olurken deney için 33.48 kN, 35.75 kN, 19.87 kN, 18.01 kN olmuştur. Dinamik şartlar altında ise sayısal analiz için ortalama kuvvet değerleri 30.12 kN, 42.11 kN, 26.34 kN, 18.22 kN seviyesinde gerçekleşirken deney için 37.60 kN, 37.46 kN, 22.31 kN, 21.23 kN gerçekleşmiştir.

3.4. Konik Boş ve Dolgulu Tüplerin Dinamik Analizi

3.4.1 Sonlu Elemanlar Yönteminde Modelin Doğruluğu

Sonlu elemanlar yönteminde Hourglass enerji sayısal analizde kullanılan ağın doğruluğu için iyi bir göstergedir. Eğer bu enerji, iç enerji değerinin % 5 den daha küçük kalırsa ağ kalitesinin yeterli olduğu ifade edilebilir [64]. Şekil 3.40'da köpük dolgulu tüpün kinetik enerji, iç enerji, Hourglass enerji ve toplam enerji eğrileri gösterilmiştir.

Görülebileceği gibi Hourglass enerji miktarı iç enerjinin %0.5'i kadardır. Sonuç olarak sonlu elemanlar modelinin ağ boyutları ve düzgün hidrodinamik parçacıkların aralarındaki uzaklığın köpük dolgululu tüp için gayet uygun olduğunu görülmektedir. Bundan dolayı ağ boyutu, eleman formülasyonu, integrasyon nokta sayısı ve temas algoritmaları bütün analizlerde aynı kullanılmıştır.



Şekil 3.40. Köpük dolgululu tüpler zamana bağlı enerji değişim eğrileri

3.4.2. İleri Beslemeli Sinir Ağlar Modelinin Doğruluğu

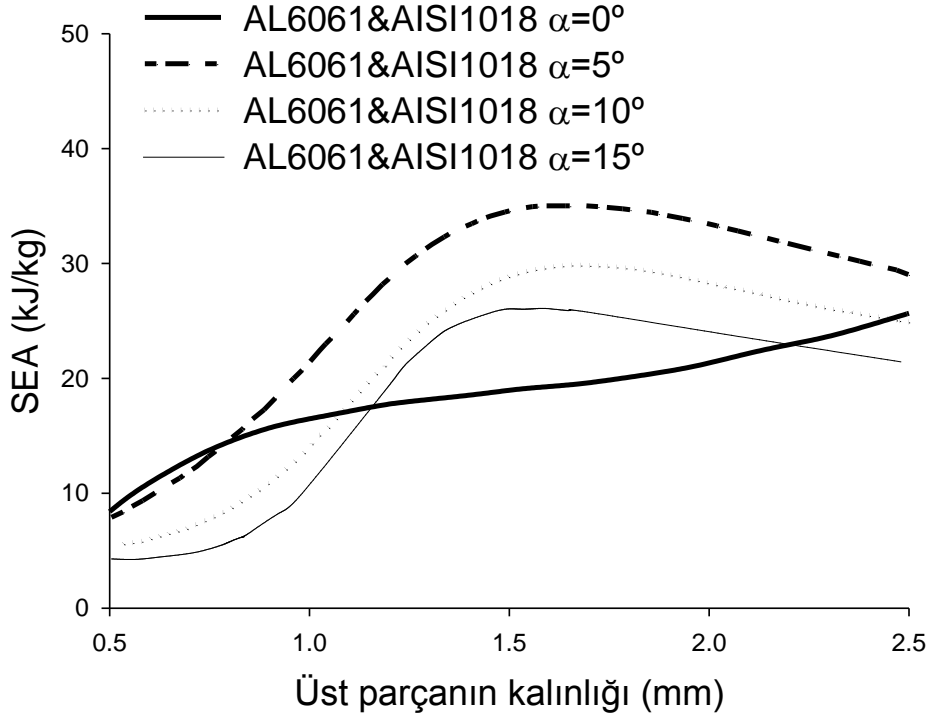
Optimizasyon çözümlerinin doğruluğunu kontrol etmek için rekare (R^2) SEA, F_{pik} , F_{ort} ve F_{mak} değerlerine bakılabilir [65]. Problemden optimizasyon modeli olarak kullanılan ileri beslemeli sinir ağların doğruluğu için bu değerlerin %90'ın üzerinde olması gerekir. Tablo 3.2.'de SEA, F_{pik} , F_{ort} ve F_{mak} değerleri için elde edilen R^2 değerleri verilmektedir. Tablo 3.2'den bu değerlerin 0.96'nın üzerinde olduğu görülmektedir.

Tablo 3.2. Optimizasyon analizi sonucunda elde edilen R2 değerleri.

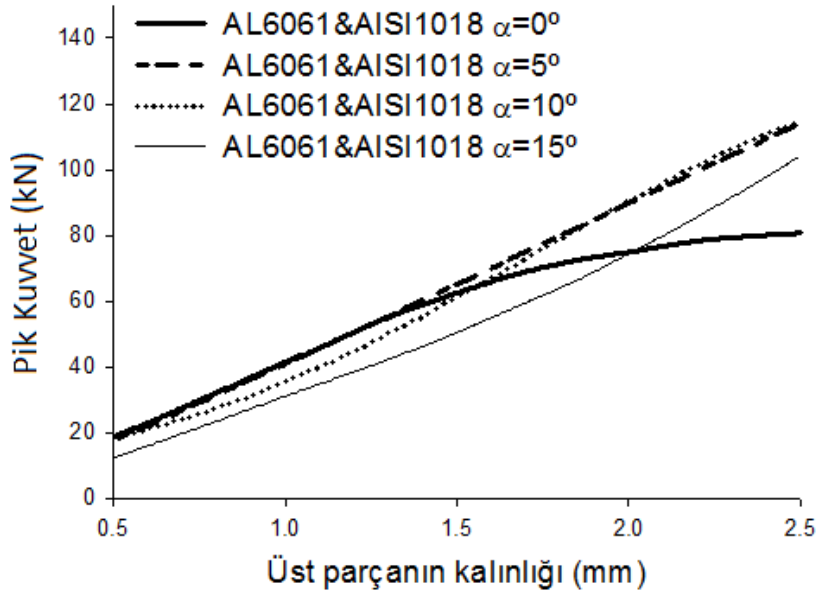
	Koniklik Açıısı	SEA	Pik Kuvvet (F_{pik})	Ortalama Kuvvet (F_{ort})	Maksimum Kuvvet (F_{mak})
BOŞ	$\alpha = 0^\circ$	0.998	1.00	0.994	1.00
	$\alpha = 5^\circ$	1.00	1.00	1.00	0.999
	$\alpha = 10^\circ$	1.00	1.00	0.998	0.985
	$\alpha = 15^\circ$	1	0.999	0.997	1.00
KÖPÜK DOLGULU	$\alpha = 0^\circ$	0.99	1.00	0.992	0.998
	$\alpha = 5^\circ$	0.991	1.00	0.998	0.997
	$\alpha = 10^\circ$	0.983	0.998	0.960	0.985
	$\alpha = 15^\circ$	0.961	0.986	0.995	0.995

Şekil 3.41'de farklı koniklik açıları için boş tüplerin üst parçanın kalınlığına bağlı olarak birim kütle başına özgül enerji sönümlenme (SEA) grafikleri görülmektedir. $\alpha=0^\circ$ için özgül enerji sönümlenme (SEA) değerinin $t_1=0.5$ mm'de 8.4 kJ/kg'dan lineere yakın bir şekilde artmaya başlayıp $t_1=2.5$ mm'de 25.70 kJ/kg'a ulaştığı görülmektedir. $\alpha =5^\circ$ koniklik için özgül enerji sönümlenme (SEA) değerinin $t_1=0.5$ mm'de 7.90 kJ/kg'dan artmaya başlamış, $t_1=1.69$ mm'de maksimum değeri olan 35.02 kJ/kg değerinden azalmış ve $t_1=2.5$ mm'de 29.01 kJ/kg olmuştur. $\alpha =10^\circ$ koniklik için özgül enerji sönümlenme değerinin $t_1=0.5$ mm'de 5.59 kJ/kg'dan artmaya başlamış, $t_1=1.65$ mm'de maksimum değeri olan 29.85 kJ/kg değerinden azalmış ve $t_1=2.5$ mm'de 24.85 kJ/kg olmuştur. Benzer şekilde $\alpha =15^\circ$ koniklik için özgül enerji sönümlenme (SEA) değeri $t_1=0.5$ mm'de 4.36 kJ/kg'dan artmaya başlamış, $t_1=1.58$ mm'de maksimum değeri olan 26.16 kJ/kg değerinden azalmış ve $t_1=2.5$ mm'de 21.52 kJ/kg'a düşmüştür.

Şekil 3.42'de üst parçanın kalınlığına göre farklı koniklik değerleri için pik kuvvet değerleri görülmektedir. $\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$ koniklikte $t_1=0.5$ mm'de tepe kuvvetleri sırayla 18.92 kN , 18.55 kN, 18.74 kN ve 12.49 kN olurken $t_1=2.5$ mm'de 80.79 kN, 113.85 kN, 11.61 kN ve 103.94 kN olmuştur.

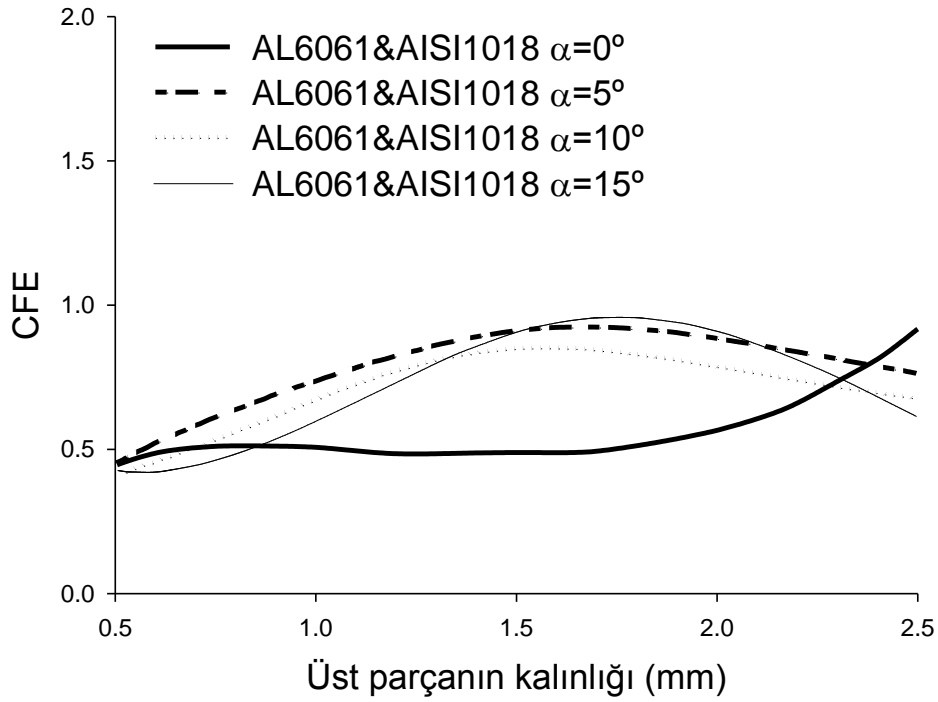


Şekil 3.41. Boş tüplerde farklı koniklik açıları için ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) özgül enerji sönmeme (SEA) miktarının tüpün üst parça kalınlığına (t_1) göre değişimi

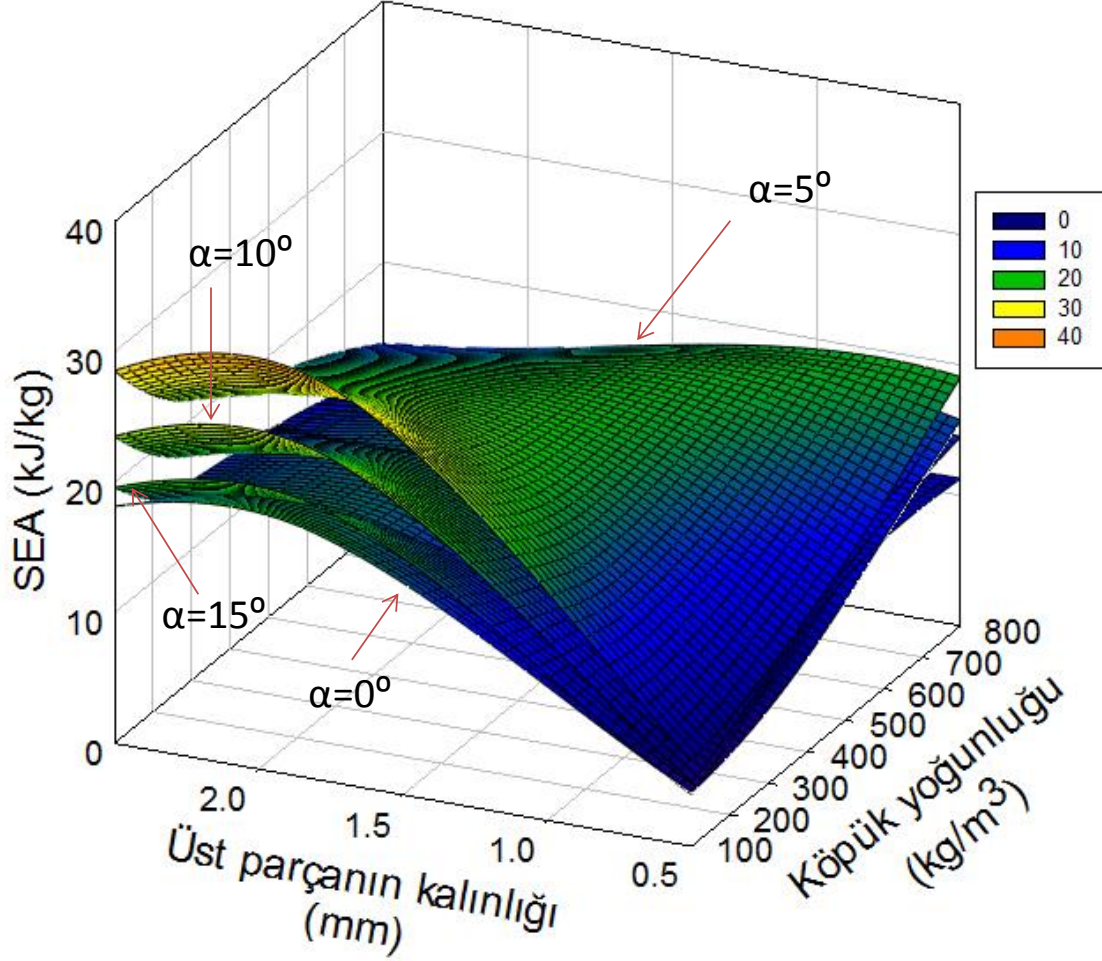


Şekil 3.42. Boş tüplerde farklı koniklik açıları için ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) pik kuvvet değerlerinin tüpün üst parça kalınlığına (t_1) göre değişimi

Şekil 3.43'de üst parçanın et kalınlığı t_1 'e göre çarpma kuvveti verimi (CFE) değişimi görülmektedir. $\alpha=0^\circ$ için üst parçanın kalınlığına bağlı olarak çarpışma kuvveti verimi $t_1=0.5$ mm'de 0.44 olarak gerçekleşirken $t_2=2.5$ mm'de 0.91 olmuştur. $\alpha=5^\circ$ için $t_1=0.5$ mm'de 0.45 değerinden başlayıp $t_1=1.66$ 'da maksimum değeri olan 0.92 'ye ulaşmış ve $t_1=2.5$ 'de 0.76 olmuştur. $\alpha=10^\circ$ için $t_1=0.5$ 'de 0.42, $t_1=1.54$ 'de 0.85 değerine kadar artmış ve $t_1=2.5$ 'de 0.67'ye düşmüştür. Aynı şekilde $\alpha=15^\circ$ için $t_1=0.5$ 'de 0.42 olurken $t_1=1.71$ 'de 0.95 ile maksimum değerine ulaşmış ve $t_1=2.5$ 'de 0.61 olmuştur.

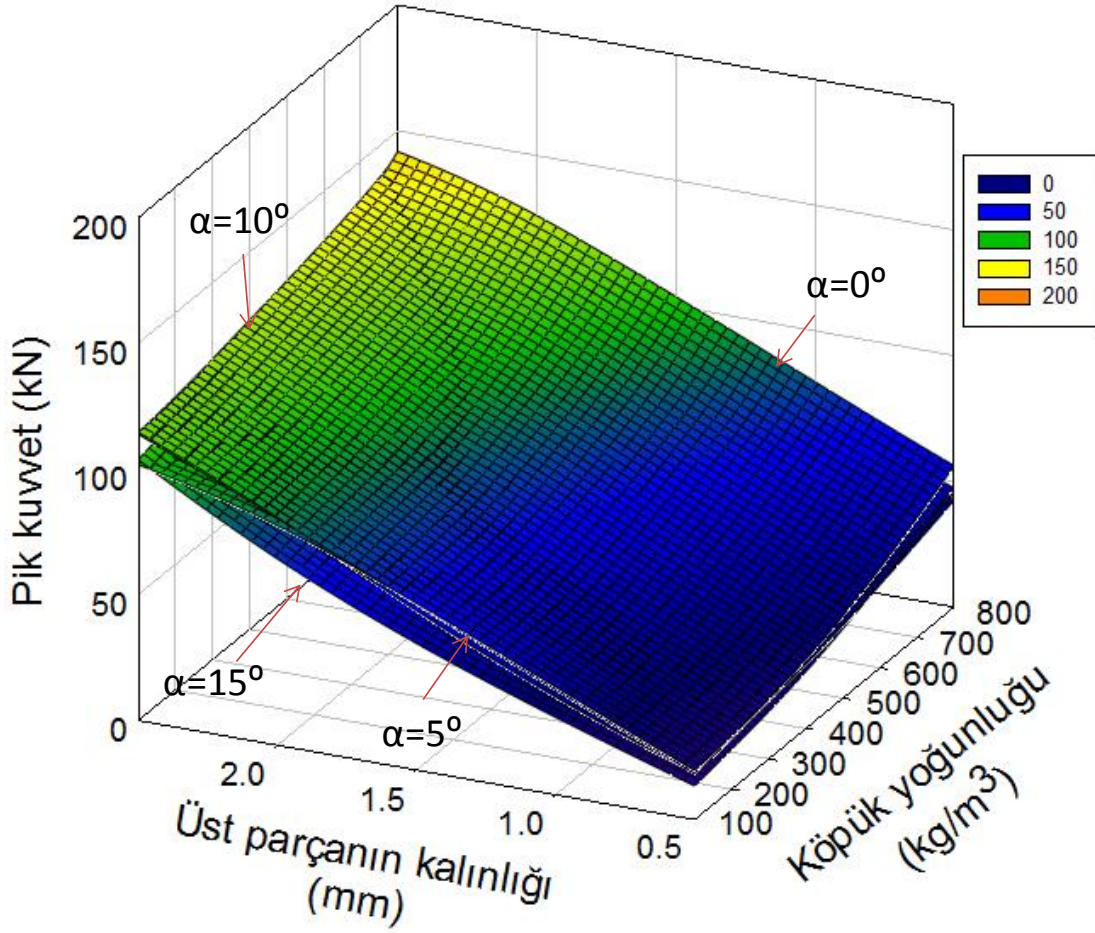


Şekil 3.43. Boş tüplerde farklı koniklik açıları için ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) çarpışma kuvveti veriminin (CFE) tüpün üst parça kalınlığına (t_1) göre değişimi



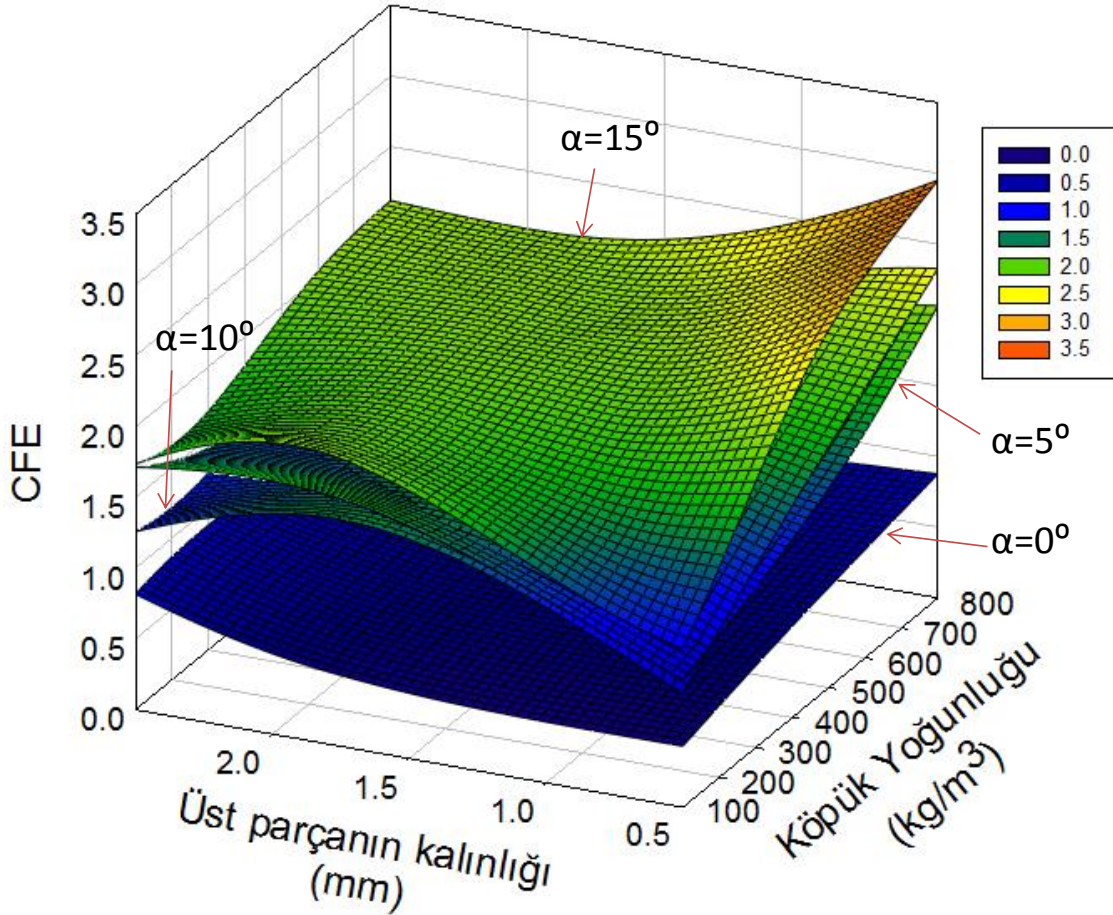
Şekil 3.44. Köpük dolgulu tüplerde farklı koniklik açıları ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) özgül enerji sönümleme (SEA) miktarının tüpün üst parça kalınlığı (t_1) ve köpük yoğunluğuna (ρ_{KOPUK}) bağlı değişimi

Şekil 3.44'de köpük yoğunluğu (ρ_{KOPUK}) ve üst parça kalınlığına (t_1) göre farklı koniklik değerleri ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) için özgül enerji sönümleme (SEA) değerlerinin değişimi görülmektedir. En yüksek özgül enerji sönümleme değerleri $\alpha=5^\circ$ koniklik için gerçekleşirken sonrasında $\alpha=10^\circ$, $\alpha=15^\circ$ ve $\alpha=0^\circ$ bunu takip etmiştir. Özgül enerji sönümleme değerleri bütün koniklik değerlerinde 100-400 kg/m³ köpük yoğunluğu için $t_1=0.5$ mm'den $t_1=2$ mm'ye kadar artarken sonrasında düşme eğilimi göstermiştir. Üst parça kalınlığı $t_1=0.5$ mm iken köpük yoğunluğuna bağlı olarak bütün koniklikler için özgül enerji sönümleme değerlerinin arttığı görülmektedir. Köpük yoğunluğu ve üst parça kalınlığının yüksek seçildiğinde özgül enerji sönümleme değerlerinin azaldığı görülmüştür.



Şekil 3.45. Köpük dolgulu tüplerde farklı koniklik açıları için ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) pik kuvvet değerlerinin tüpün üst parça kalınlığı (t_1) ve köpük yoğunluğuna ($\rho_{\text{KÖPÜK}}$) bağlı değişimi

Şekil 3.45'da köpük yoğunluğu ($\rho_{\text{KÖPÜK}}$) ve üst parça kalınlığına (t_1) göre farklı koniklik değerleri ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) için pik kuvvet değerlerinin değişimi görülmektedir. Üst parçanın kalınlığı ve köpük yoğunluğuna göre pik kuvvet değerlerinin arttığı görülmektedir. Köpük dolgulu tüplerde dolgu malzemesi olan köpüğün oluşturduğu ilave direnç ile boş tüplere göre pik kuvvetlerin ve sönmülenen enerji miktarlarının fazla olduğu görülmektedir.

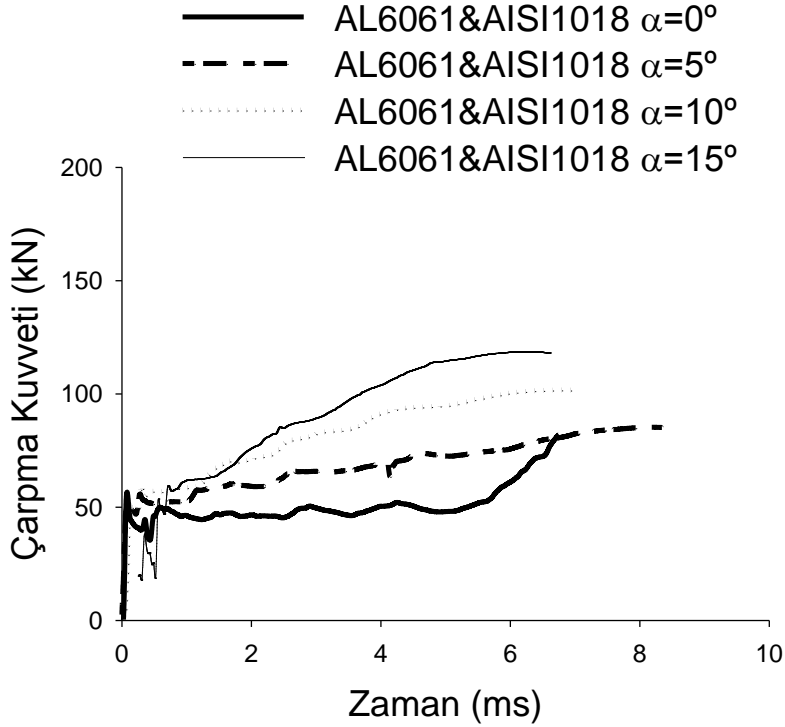


Şekil 3.46. Köpük dolgulu tüplerde farklı koniklik açıları ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) çarpışma kuvveti verimi (CFE) değerinin tüpün üst parça kalınlığı (t_1) ve köpük yoğunluğuna (ρ_{KOPUK}) bağlı değişimi

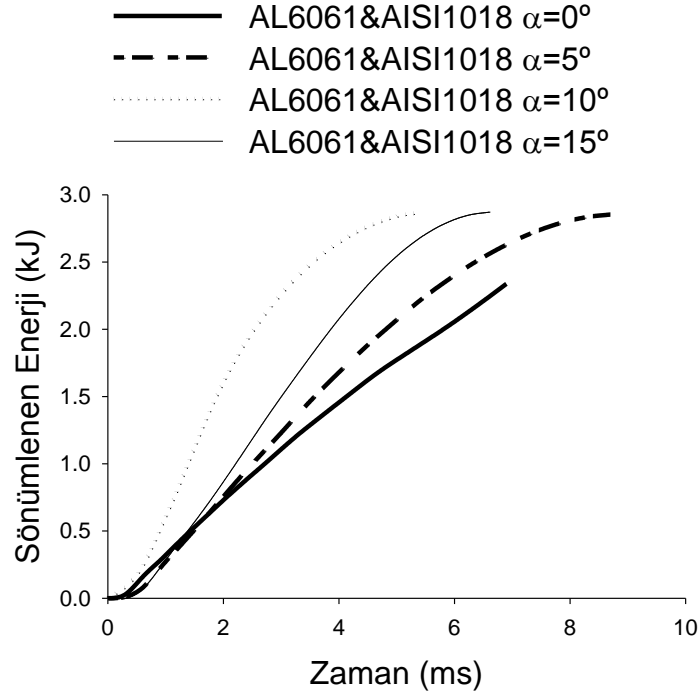
Şekil 3.46'de köpük yoğunluğu (ρ_{KOPUK}) ve üst parça kalınlığına (t_1) göre farklı koniklik değerleri ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) için çarpışma kuvveti veriminin (CFE) değişimi görülmektedir. Koniklik açısının çarpışma kuvveti verimini arttırdığı Şekil 3.37'den görülmektedir. En yüksek çarpışma kuvveti verimi $\alpha=15^\circ$ tüpler için gerçekleşirken en düşük çarpışma kuvveti verimi değerleri $\alpha=0^\circ$ için gerçekleşmiştir. $\alpha=5^\circ$ değerinde düşük köpük yoğunluğunda çarpışma kuvveti verimi değerleri $\alpha=10^\circ$ 'den yüksek çıkarken yüksek köpük yoğunluklarında $\alpha=10^\circ$ tüplerin çarpışma kuvveti veriminin $\alpha=5^\circ$ tüplerden daha yüksek olduğu görülmüştür.

Şekil 3.47'de köpük dolgulu, farklı koniklik açılara sahip ve üst parça kalınlığı $t_1=0.5$ mm olan tüplerin çarpma kuvveti-zaman grafikleri görülmektedir. $\alpha=0^\circ$ için pik kuvvet 49.81 kN, $\alpha=5^\circ$ için 59.37 kN, $\alpha=10^\circ$ için 59.51 kN, $\alpha=15^\circ$ için 51.42 kN olmuştur. Şekil 3.48 üst parça kalınlığı 0.5 mm olan köpük dolgulu tüplerin farklı konikliklere göre sönmelenen enerji zaman grafiği göstermektedir. $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$ koniklik açıları için sistemin toplam

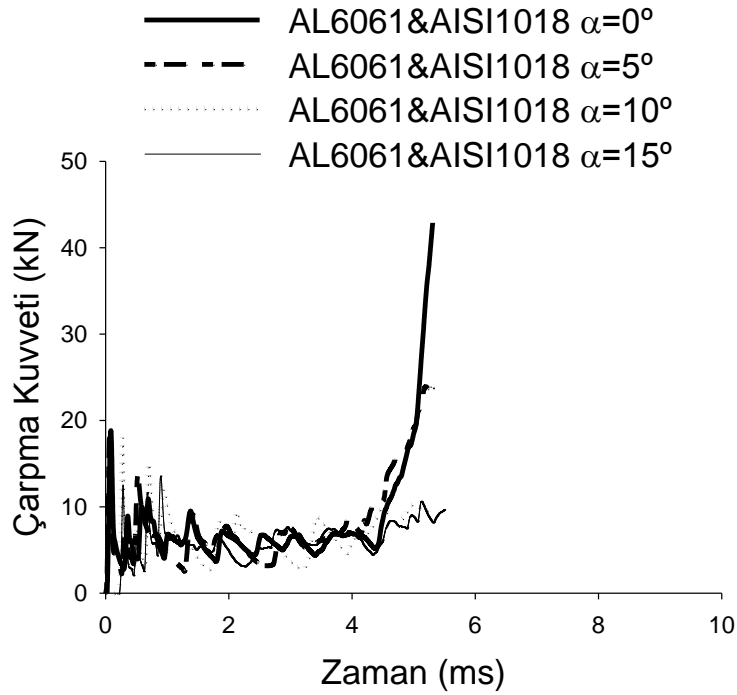
enerjisi sönümlenirken $\alpha=0^\circ$ için ise sistem toplam enerjisi sönümlenmeden, sınır şartlarına ulaşıldığı için analiz durmuştur. Şekil 3.49'da boş, farklı koniklik açılara sahip ve üst parça kalınlığının 0.5 mm olduğu tüpler için çarpışma kuvveti-zaman grafiklerini göstermektedir. Şekil 3.50'de diğer çarpışma kuvveti-zaman grafiklerinden farklı olarak y-ekseni skalası 0-50 arasında değişmektedir. Pik kuvvetler $\alpha=0^\circ$ için 18.60 kN, $\alpha=5^\circ$ için 17.69 kN, $\alpha=10^\circ$ için 18.06 kN ve $\alpha=15^\circ$ için ise 12.78 kN olarak gerçekleşmiştir. Şekil 3.48 üst parça kalınlığı 0.5 mm olan, boş tüplerin farklı konikliklere göre sönümlenen enerji-zaman grafikleri görülmektedir. Artan koniklik açısına göre sönümlenen enerji miktarları 0.33 kJ, 0.37 kJ, 0.33 kJ ve 0.30 kJ olmuştur. Bütün koniklik açıları için analizler toplam deformasyon strokunun 50 mm'ye ulaştığı anda durdurulması için verilen sınır şartına ulaşmış ve sistem toplam enerjisi sönümlenmeden durmuştur. Şekil 3.4 ve Şekil 3.49'a bakıldığında köpük dolgusunun enerji sönümleme davranışı üzerindeki etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 3.51'de üst parça kalınlığının 0.5 mm olduğu köpük dolgulu ve boş tüplerin farklı koniklik açıları için deformasyon sonrası şekilleri görülmektedir.



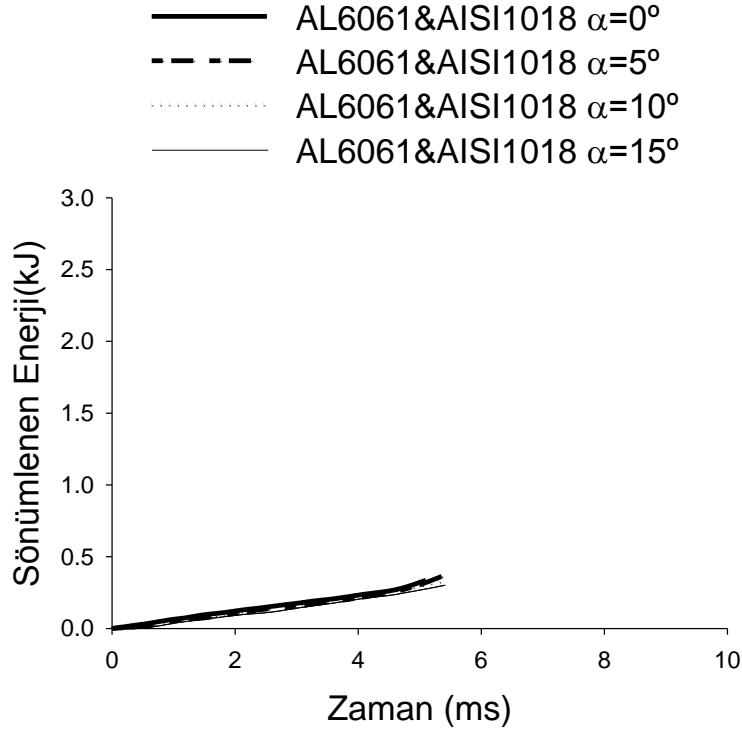
Şekil 3.47. $t_1=0.5$ mm, köpük dolgulu ve farklı koniklik ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) açılara sahip Al6061&AISI1018 tüplerin çarpma kuvveti zaman grafikleri



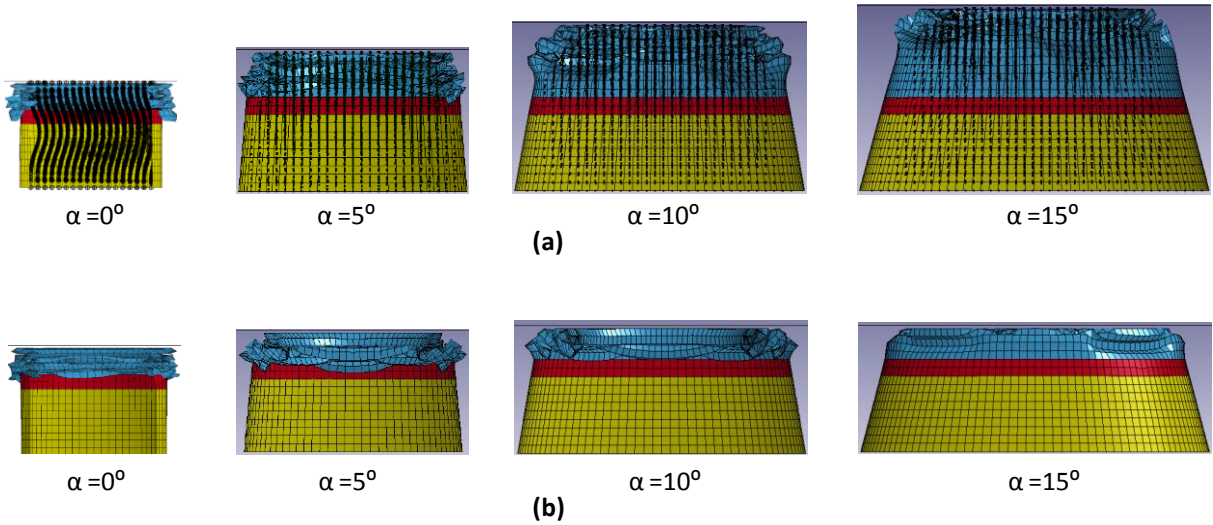
Şekil 3.48. $t_1=0.5$ mm, köpük dolgululu ve farklı koniklik ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) açılara sahip AL6061&AISI1018 tüplerin zaman-sönümlenen enerji grafikleri



Şekil 3.49. $t_1=0.5$ mm, boş ve farklı koniklik ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) açılara sahip AL6061&AISI1018 tüplerin çarpma kuvveti zaman grafikleri



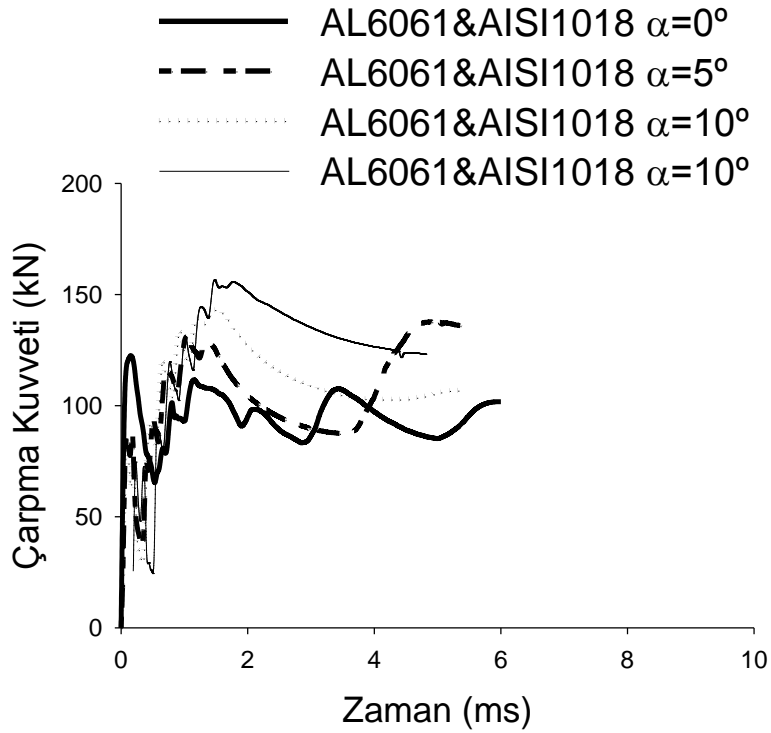
Şekil 3.50. $t_1=0.5$ mm boş ve farklı koniklik ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) açılara sahip AL6061&AISI1018 tüplerin zaman-sönümlenen enerji grafikleri



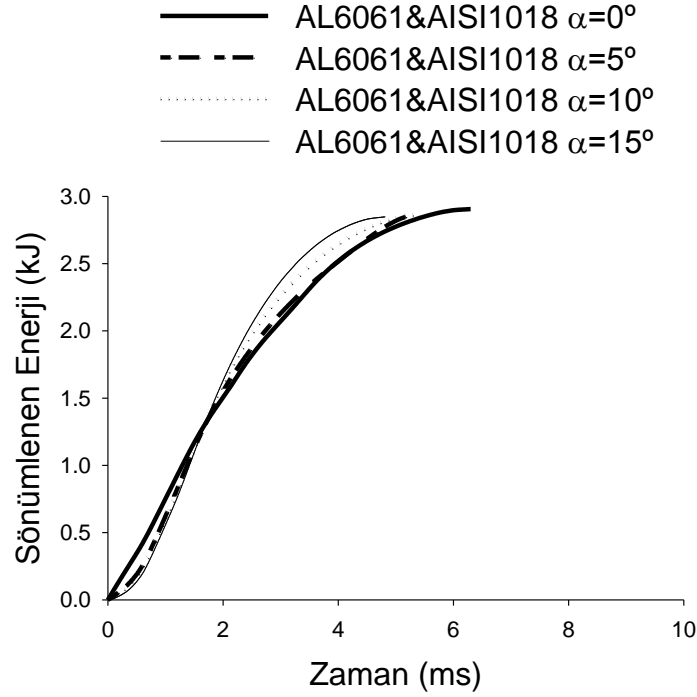
Şekil 3.51. $t_1=0.5$ mm, köpük dolgulu (a) ve boş (b) tüplerin farklı koniklik açıları için deformasyon durumları

Şekil 3.52 üst parça kalınlığının 1.91 mm olan köpük dolgulu tüplerin farklı koniklik açılarına göre çarpma-kuvveti-zaman grafiklerini göstermektedir. İlk pik kuvvetler artan koniklik açısına göre sırayla 122.55 kN, 85.58 kN, 83.92 kN ve 72.18 kN olmuştur. Koniklik açısının artması ile pik kuvvet düşmüştür. Şekil 3.53 üst parça kalınlığının 1.91 mm olduğu köpük dolgulu tüpler için farklı koniklik açılarına göre sönümlenen enerji-zaman grafiğini

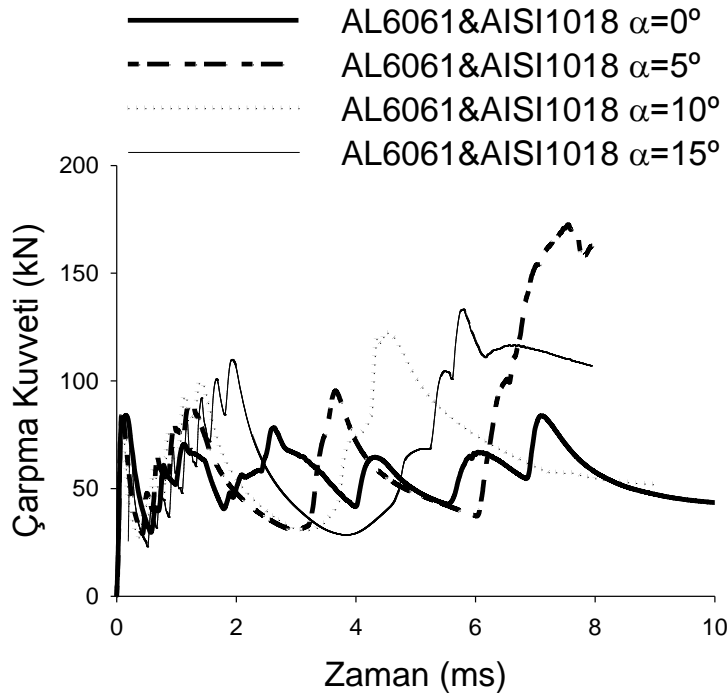
göstermektedir. Bütün koniklik açıları için sistemin toplam enerjisinin tümü sönmülmüştür. Şekil 3.54 üst parça kalınlığı 1.91 mm olan boş tüplerin farklı koniklik açıları için çarpma kuvveti-zaman grafiklerini göstermektedir. Oluşan ilk pik kuvvetler $\alpha=0^\circ$ için 84.05 kN, $\alpha=5^\circ$ için 85.58 kN, $\alpha=10^\circ$ için 83.92 kN ve $\alpha=15^\circ$ için ise 72.18 kN olarak gerçekleşmiştir. Şekil 3.55 üst parça kalınlığı 1.91 mm olan farklı koniklik açlarına sahip boş tüplerin sönmülmüş enerji-zaman grafiklerini göstermektedir. Grafiklerden sistemin toplam enerjisinin tümünün sönmülmüş olduğu görülmektedir. Şekil 3.56'da ise üst parça kalınlığı 1.91 mm olan köpük dolgulu ve boş tüplerin farklı koniklik açlarına göre analiz sonucu deforme olmuş halleri görülmektedir.



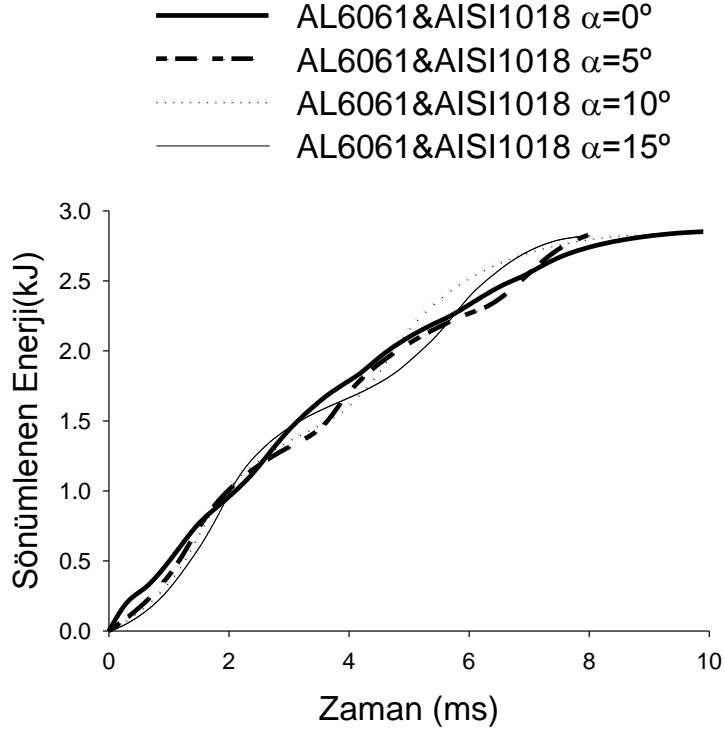
Şekil 3.52. $t_1=1.9$ mm, köpük dolgulu ve farklı koniklik ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) açılara sahip Al6061&AISI1018 tüplerin çarpma kuvveti zaman grafikleri



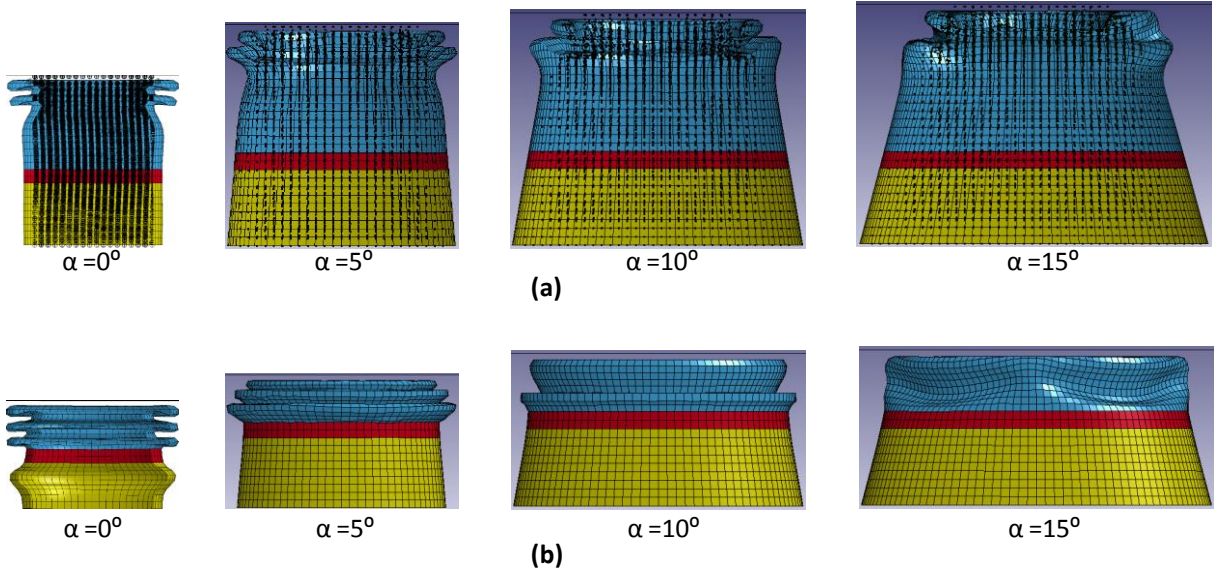
Şekil 3.53. $t_1=1.9$ mm, köpük dolgululu ve farklı koniklik ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) açılara sahip Al6061&AISI1018 tüplerin zaman-sönümlenen enerji grafikleri



Şekil 3.54. $t_1=1.9$ mm ve boş, farklı koniklik ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) açılara sahip Al6061&AISI1018 tüplerin çarpma kuvveti zaman grafikleri



Şekil 3.55. $t_1=1.9$ mm ve boş, farklı koniklik ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $\alpha=10^\circ$ ve $\alpha=15^\circ$) açılara sahip Al6061&AISI1018 tüplerin zaman-sönümlenen enerji grafikleri



Şekil 3.56. $t_1=1.9$ mm, köpük dolgulı (a) ve boş (b) tüplerin farklı koniklik açıları için deformasyon durumları

3.4.3. Optimum Sonuçlar

Tablo 3.3'te boş ve köpük dolgulı tüplere ait farklı koniklik açlarına göre üst parça kalınlığı ve köpük yoğunluğunun optimum değerleri görülmektedir. Köpük dolgulı tüplerde koniklik açısı artarken optimum üst parça kalınlığının arttığı fakat köpük yoğunluğunun azaldığı görülmektedir. Boş tüplerde en yüksek üst parça kalınlığı 1.65 mm ile $\alpha=10^{\circ}$ koniklikte gerçekleşirken en düşük üst parça kalınlığı ise 1.55 mm ile $\alpha=15^{\circ}$ koniklik açısında gerçekleşmiştir. $\alpha=0^{\circ}$ ve $\alpha=5^{\circ}$ koniklik için ise üst parça kalınlıkları sırasıyla 1.61mm ve 1.59 mm olmuştur.

Tablo 3.3. Boş ve köpük dolgulı tüplerin farklı koniklik açlarına bağı olarak optimum köpük yoğunluğu ve üst parça kalınlığı değerleri

	Koniklik Açısı	Üst parça kalınlığı (mm)	Köpük yoğunluğu u (kg/m^3)	SEA (kJ/kg)	Pik Kuvvet (kN)	CFE
BOŞ	$\alpha = 0^{\circ}$	1.61	-	18.63	69.97	0.65
	$\alpha = 5^{\circ}$	1.59	-	26.38	69.96	0.91
	$\alpha = 10^{\circ}$	1.65	-	27.24	69.94	0.85
	$\alpha = 15^{\circ}$	1.55	-	27.38	53.08	0.93
KÖPÜK DOLGULU	$\alpha = 0^{\circ}$	1.41	409	17.49	69.97	0.70
	$\alpha = 5^{\circ}$	1.54	212	25.55	67.19	0.76
	$\alpha = 10^{\circ}$	1.64	100	22.85	69.70	0.69
	$\alpha = 15^{\circ}$	1.90	100	25.69	70.28	1.00

4. SONUÇLAR

Alt kalıp kullanılmış düz tüpler ile içi boş ve köpük dolgulu tüplerin enerji sönümlenme davranışının incelendiği bu tezde şu sonuçlar elde edilmiştir.

- Alt kalıp açısının artması ile Al6063 ve St52 tüplerde ortalama kuvvet değerleri azalmıştır. Ortalama kuvvet değerindeki düşüş $\lambda=0^0$ 'ye göre $\lambda=15^0$ 'de belirgin bir şekilde görülmezken $\lambda=30^0$ ve $\lambda=45^0$ için belirgin bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Al6063&St52 tüplerde ise ortalama kuvvet değerleri $\lambda=0^0$ 'ye göre $\lambda=15^0$ için artarken $\lambda=30^0$ ve $\lambda=45^0$ için belirgin bir şekilde düşmüştür.
- Al6063 tüplerde alt kalıp açısının artması ile pik kuvvet değerleri azalmıştır. St52 tüplerde statik durumda alt kalıp açısının artması ile pik kuvvet değerleri düşerken dinamik durumda ise $\lambda=15^0$ için artmış, $\lambda=30^0$ ve $\lambda=45^0$ için azalmıştır.
- Dinamik şartlar altında Al6063 ve St52 tüpler için sönümlenen enerji miktarı kalıp açısının artması ile azalmıştır. Sönümlenen enerji Al6063 ve St52 tüplerde $\lambda=30^0$ ve $\lambda=45^0$ için benzer bir eğilim gösterip aynı seviyede kalmıştır. Al6063&St52 tüplerde ise $\lambda=0^0$, $\lambda=15^0$ ve $\lambda=30^0$ için aynı olurken $\lambda=45^0$ için azalmıştır.
- Boş tüplerde koniklik açısı arttıkça özgül enerji sönümlenme (SEA) değeri ve pik kuvvet değeri azalmıştır.
- Köpük dolgulu tüplerde üst parçanın kalınlığı ve köpük yoğunluğuna bağlı olarak özgül enerji sönümlenme değeri artarken $\alpha=5^0$ koniklikte maksimum olmuş ve koniklik açısının artması ile azalmıştır.
- Köpük dolgulu tüplerde üst parçanın kalınlığı ve köpük yoğunluğuna bağlı olarak pik kuvvet artmıştır.
- Köpük dolgulu tüplerde köpük yoğunluğuna bağlı olarak çarpma kuvveti verimi (CFE) artarken; üst parçanın kalınlığına göre ise üst parçanın kalınlığı 0.5-2 mm arasında artmış, 2-2.5 mm arasında ise azalmıştır.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar neticesinde aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur.

- Farklı malzemelerin enerji sönümlene kabiliyetini incelemek amacıyla tüplerin malzemeleri değiştirilebilir.
- Düz tüplerin farklı et kalınlıkları için çalışmalar yapılabilir.
- Tüplerdeki çentik tipi, sayısı ve dağılımı değiştirilerek çalışmalar yapılabilir.
- Farklı dolgu malzemelerin enerji sönümlene kabiliyetine etkileri incelenebilir

6. KAYNAKLAR

1. http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1051. Tük. 1 Mayıs 2014.
2. Öztürk, İ. ve Kaya, N., Otomobil Ön Tampon Çarpışma Analizi Ve Optimizasyonu, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 13,6 (2008) 119-127.
3. Kwok, K., Mechanics of Viscoelastic Thin-Walled Structures, Doktora Tezi, California Institute of Technology, California 2013.
4. Huang X, Lu G, Yu T., On the axial splitting and curling of circular metal tubes, International Journal of Mechanical Sciences, 44,11 (2002) 2369-2391.
5. Nagel G., Impact and Energy Absorption of Straight and Tapered Rectangular Tubes, Doktora Tezi, Queensland University of Technology, Avusturalya, 2005.
6. <http://www.carlawfirm.com/wp-content/uploads/2013/06/car.png> 1 Mayıs 2014.
7. Salehghaffari S, Tajdari M, Panahi M ve Mokhtarnezhad F., Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading, Thin-Walled Structures, 48, 6 (2010) 379-390.
8. Lion, K., Radzi Abdul, G., Prasetyo, E. ve Khairi, Y., Impact Energy Absorption of Concentric Circular Tubes, Wseas Transactions On Applied And Theoretical Mechanics, 3, 4 (2009) 95-108.
9. Alghamdi AAA., Collapsible impact energy absorbers: an overview, Thin-Walled Structures, 39, 2 (2001) 189-213.
10. Lima RM., Ismarrubie ZN., Zainudin ES. ve Tang SH, Energy Absorption Capability of Hybrid Tube Made by Mild Steel and GFRP under Quasi-Static Loading, Advanced Materials Research, 383-390 (2012) 2741-2746.
11. Gümrük, R., Şekil Verme İşleminin Çarpma Performansına Etkilerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006.
12. Dilek D.B., Kare Kesitli Tailor-Welded Tüplerin Enerji Sönümlenme Özelliklerinin Optimizasyon Yöntemiyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2013.
13. JM. Alexander, An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading, Q J Mech Appl Maths, 13 (1960) 10-15.
14. Johnson W., Impact Strength of Materials, London, 1972.

15. Abramowicz W. ve Jones N., Dynamic axial crushing of square tubes, International Journal of Impact Engineering, 2,2 (1984) 179-208.
16. Abramowicz W. ve Jones N., Dynamic progressive buckling of circular and square tubes, International Journal of Impact Engineering, 4,4 (1986) 243-70.
17. Wierzbicki T., Bhat SU., Abramowicz W., Brodtkin D. ve Alexander, A two folding elements model of progressive crushing of tubes, International Journal of Solids and Structures. 29,24 (1992) 3269-3288.
18. Guillow SR., Lu G. ve Grzebieta RH., Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes, International Journal of Mechanical Sciences, 43,9 (2001) 2103-2123.
19. Daneshi GH. ve Hosseinipour SJ., Grooves effect on crashworthiness characteristics of thin-walled tubes under axial compression. Materials & Design, 23,7 (2002) 611-617.
20. Mamalis AG., Manolakos DE., Ioannidis MB., Kostazos PK ve Dimitriou C., Finite element simulation of the axial collapse of metallic thin-walled tubes with octagonal cross-section, Thin-Walled Structures, 41,10 (2003) 891-900.
21. Rosa PA., Rodrigues JMC. ve Martins PAF., Internal inversion of thin-walled tubes using a die: experimental and theoretical investigation, International Journal of Machine Tools and Manufacture 44,7-8 (2004) 775-784.
22. Nagel GM. ve Thambiratnam DP., Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular tubes, Thin-Walled Structures, 43,8 (2005) 1225-1242.
23. Tarigopula V., Langseth M., Hopperstad OS. ve Clausen AH. Axial crushing of thin-walled high-strength steel sections, International Journal of Impact Engineering, 32,5 (2006) 847-882.
24. Zhang XW. ve Yu TX., Energy absorption of pressurized thin-walled circular tubes under axial crushing, International Journal of Mechanical Sciences, 51, 5 (2009) 335-349.
25. Alavi Nia A, Haddad Hamedani J. Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries, Thin-Walled Structures. 2010,48 (2012) 946-54.
26. Bambach MR. Axial capacity and crushing of thin-walled metal, fibre-epoxy and composite metal-fibre tubes, Thin-Walled Structures, 48,6 (2010) 440-52.
27. Salehghaffari S, Tajdari M, Panahi M, Mokhtarnezhad F. Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading, Thin-Walled Structures, 48,6 (2010) 379-90.

28. Ghamarian A, Zarei HR, Abadi MT. Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes, Thin-Walled Structures, 49,10 (2011) 1312-9.
29. Song J, Chen Y, Lu G. Axial crushing of thin-walled structures with origami patterns, Thin-Walled Structures, 54,0 (2012) 65-71.
30. Fan Z, Lu G, Liu K. Quasi-static axial compression of thin-walled tubes with different cross-sectional shapes, Engineering Structures, 55,0 (2013) 80-89.
31. Alavi Nia A ve Parsapour M., An investigation on the energy absorption characteristics of multi-cell square tubes, Thin-Walled Structures, 68,0 (2013) 26-34.
32. Oka, S.H., Alüminyum Köpük Metalinin Farklı Yükleme Koşullarındaki Mekanik Özelliklerinin Deneysel Ve Matematik Modellemesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 2009.
33. Bock J. J., A Geometric Study Of Liquid Retention In Open-Cell Metal Foams, Doktora Tezi, University Of Illinois, At Urbana-Champaign, 2011.
34. Kara E., Çeşitli Elyaf Dizilimleriyle Oluşturulmuş Metal Köpük Çekirdekli Sandviç Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi, Çorum 2012.
35. Başpınar M. S., ve Yurtçu Ş., Metalik Köpük Malzemelerin Mekanik Özelliklerini Belirlemede Kullanılan Matematiksel Modeller, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, (2011) 69-78.
36. Zhang C-j., Feng Y. ve Zhang X-b., Mechanical properties and energy absorption properties of aluminum foam-filled square tubes, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 20,8 (2010) 1380-1386.
37. Seitzberger M., Rammerstorfer FG., Gradinger R., Degischer HP., Blaimschein M ve Walch C., Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminium foam, International Journal of Solids and Structures, 37,30 (2000) 4125-4147.
38. Chen W. ve Wierzbicki T., Relative merits of single-cell, multi-cell and foam-filled thin-walled structures in energy absorption, Thin-Walled Structures, 39,4 (2001) 287-306.
39. Toksoy A.K. ve Güden M., The strengthening effect of polystyrene foam filling in aluminum thin-walled cylindrical tubes, Thin-Walled Structures, 43,2 (2005) 333-350.
40. Zhang X., Cheng G. A., comparative study of energy absorption characteristics of foam-filled and multi-cell square columns, International Journal of Impact Engineering, 34,11 (2007) 1739-1752.
41. Ahmad Z. ve Thambiratnam DP., Crushing response of foam-filled conical tubes under quasi-static axial loading, Materials & Design, 30,7 (2009) 2393-2403.

42. Ahmad Z. ve Thambiratnam DP., Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading, Computers & Structures, 7,3-4 (2009) 8186-8197.
43. Rajendran R., Prem Sai K., Chandrasekar B., Gokhale A. ve Basu S., Impact energy absorption of aluminium foam fitted AISI 304L stainless steel tube, Materials & Design, 30,5 (2009) 1777-1784.
44. Alavi Nia A. ve Sadeghi MZ., The effects of foam filling on compressive response of hexagonal cell aluminum honeycombs under axial loading-experimental study, Materials & Design, 31,3 (2010) 1216-1230.
45. Ghamarian A., Zarei HR. ve Abadi MT., Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes, Thin-Walled Structures, 49,10 (2011) 1312-1319.
46. Zhang Z-y., Yang H., Li H., Ren N. ve Tian Y-l., Bending behaviors of large diameter thin-walled CP-Ti tube in rotary draw bending, Progress in Natural Science: Materials International, 21,5 (2011) 401-412.
47. Merklein M., Johannes M., Lechner M. ve Kuppert A., A review on tailored blanks—Production, applications and evaluation, Journal of Materials Processing Technology, 214,2 (2014) 151-164.
48. Zhan M., Du H., Liu J., Ren N., Yang H., Jiang H., et al., A method for establishing the plastic constitutive relationship of the weld bead and heat-affected zone of welded tubes based on the rule of mixtures and a microhardness test, Materials Science and Engineering, 527,12 (2010) 2864-2874.
49. Gedikli H., Numerical investigation of axial crushing behavior of a tailor welded tube, Materials & Design, 44,0 (2013) 587-595.
50. Gedikli H., Crashworthiness optimization of foam-filled tailor-welded tube using coupled finite element and smooth particle hydrodynamics method, Thin-Walled Structures, 67,0 (2013) 34-48.
51. Reddy TY., Reid SR., Axial splitting of circular metal tubes, International Journal of Mechanical Sciences, 28,2 (1986) 111-131.
52. Niknejad A., Rezaei B., Liaghat GH., Empty circular metal tubes in the splitting process – theoretical and experimental studies, Thin-Walled Structures, 72,0 (2013) 48-60.
53. Huang X., Lu G., Yu TX., Energy absorption in splitting square metal tubes, Thin-Walled Structures, 40,2 (2002) 153-165.
54. http://www.businessweek.com/archives/2000/b3705139.arc.htm?campaign_id=search#B3705139, Businessweek. 1 Mayıs 2014.

55. Gül Gökay E. ve Çağatan T., Genetik Algoritmalar Ve Uygulama Alanları, Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 21, 1 (2002) 129-152.
56. Engin O., Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Genetik Algoritma ile Çözüm Performansının Arttırılmasında Parametre Optimizasyonu, Doktora Tezi, İTÜ İstanbul, 2001.
57. Johnson W. C. G., A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rate and high temperatures, Proceedings of the seventh international symposium on ballistics, Hague, Netherlands, 1983.
58. Fish J., Oskay C. ve Barsoum R., AL6061-T6-elastomeer impact simulations, Rensselaer polytechnic institute, (2005).
59. Sasso M., Newaz G. ve Amodio D., Material characterization at high strain rate by Hopkinson bar tests and finite element optimization, Materials Science and Engineering 487,1-2 (2008) 289-300.
60. Padmanabhan R., Oliveira MC. ve Menezes LF., Deep drawing of aluminium-steel tailor-welded blanks, Materials & Design, 29,1 (2008) 154-160.
61. Attia MS., Meguid SA. ve Nouraei H., Nonlinear finite element analysis of the crush behaviour of functionally graded foam-filled columns, Finite Elements in Analysis and Design, 61,0(2012) 50-59.
62. Zarei H. ve Kröger M., Optimum honeycomb filled crash absorber design, Materials & Design, 29,1 (2008) 193-204.
63. Acar E., Guler MA., Gerçeker B., Cerit ME. ve Bayram B., Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled tubes with axisymmetric indentations, Thin-Walled Structures, 49,1 (2011) 94-105.
64. Attia MS., Meguid SA. ve Nouraei H., Nonlinear finite element analysis of the crush behaviour of functionally graded foam-filled columns, Finite Elements in Analysis and Design. 61,0 (2012) 50-59.
65. Ls-Opt User's manual, LSTC; 2010.

7. EKLER

Ek 1. Alt kalıp açısına göre pik kuvvet değerleri (kN)

		Statik				Dinamik			
		Sayısal		Deneysel		Sayısal		Deneysel	
Al6063	$\lambda = 0^\circ$	43.06		41.35		34.47		37.83	
	$\lambda = 15^\circ$	30.57		38.70		29.70		31.63	
	$\lambda = 30^\circ$	16.05		17.50		13.66		12.10	
	$\lambda = 45^\circ$	13.11		9.24		11.05		10.92	
St52	$\lambda = 0^\circ$	85.22		69.38		94.38		113.57	
	$\lambda = 15^\circ$	63.41		68.37		105.19		114.63	
	$\lambda = 30^\circ$	30.98		33.22		37.36		37.32	
	$\lambda = 45^\circ$	21.31		24.28		26.16		24.94	
Al6063 & St52		İlk pik	İkinci pik	İlk pik	İkinci pik	İlk pik	İkinci pik	İlk pik	İkinci pik
	$\lambda = 0^\circ$	33.97	58.24	40.70	68.69	35.78	-	38.40	-
	$\lambda = 15^\circ$	34.42	62.07	40.48	66.72	49.15	41.28	39.89	44.47
	$\lambda = 30^\circ$	19.25	34.20	28.50	40.81	38.00	41.92	37.39	57.24
	$\lambda = 45^\circ$	19.12	32.22	23.34	40.52	26.34	34.18	31.22	30.72

ÖZGEÇMİŞ

Dursun MERİÇ 1983 yılında İstanbul'da doğdu. İlk orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladıktan sonra Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2006 yılında mezun oldu. Özel sektörde çeşitli firmalarda çalıştıktan sonra 2010 yılından beri Karadeniz Teknik Üniversitesi A. Kanca MYO'da Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. Ayrıca İngilizce bilmektedir.